



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

**AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECCÂNICAS
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO
EQUIPAMENTOS *FACTS***

João Pedro Carvalho Silveira

Universidade de Brasília - Faculdade do Gama

Brasília, Julho de 2013



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade do Gama

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

**AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO
EQUIPAMENTOS *FACTS***

João Pedro Carvalho Silveira

Prof. Flávio H. J. R. Silva, FGA/UnB
Orientador

Prof. Luis Filomeno de Jesus Fernandes, FGA/UnB
Examinador

Prof. Jorge Andrés Corname Angarita, FGA/UnB
Examinador

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por me dar forças para superar as adversidades, e as condições necessárias para continuar trilhando o caminho para atingir meus objetivos.

Ao professor Flávio Henrique, por me orientar no trabalho de conclusão de curso de maneira excelente, me auxiliando nas maiores dúvidas e me direcionando adequadamente para o bom rumo da pesquisa.

Ao professor Marcus Vinicius Girão, pela oportunidade e orientação exemplar na área de pesquisa acadêmica, por me ensinar e auxiliar no uso do software MatLab na utilização em simulações numéricas.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio incondicional, estímulo e por criarem uma base que possibilita que eu seja uma pessoa melhor.

João Pedro Carvalho Silveira

RESUMO

Na atualidade, cada vez mais a sociedade exige um maior fornecimento de energia elétrica de maneira ininterrupta. Para atender esses requisitos as concessionárias de energia devem garantir a confiabilidade do sistema elétrico, mesmo nas situações mais críticas. O crescente aumento de carga, nos últimos anos, impulsionou a interligação entre os sistemas elétricos utilizando a transmissão de potência através de linhas longas de alta capacidade. Com essa interligação, a modelagem dos sistemas elétricos de potência tornou-se mais complexa, desta forma o estudo sobre estabilidade tornou-se de vital importância, principalmente na área de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência.

Durante a operação dos sistemas elétricos, perturbações de grande e pequeno porte podem ocorrer. Essas perturbações são responsáveis por acarretar oscilações eletromecânicas nos geradores síncronos. Quando o sistema está sujeito a uma perturbação, o seu funcionamento fica prejudicado, acarretando problemas para a sociedade, podendo até implicar no desligamento de uma parte ou de todo o sistema interligado. Para minimizar essas ocorrências é necessário realizar a análise da estabilidade para os variados tipos de oscilações que podem atingir o sistema elétrico.

Uma forma de atenuar essas oscilações é utilizando equipamentos *FACTS* (do inglês - 'Flexible Alternative Current Transmission Systems'). Esses equipamentos são capazes de aumentar a capacidade de transmissão de potência e propiciar um controle rápido no fluxo de potência na linha, aumentando a confiabilidade do sistema. Este trabalho realiza a análise de estabilidade transitória e a influência dos equipamentos *FACTS* na dinâmica do sistema elétrico frente a ocorrência de perturbações.

Palavras-chave: sistemas elétricos de potência, estabilidade transitória, *FACTS*, oscilações eletromecânicas, curto-circuito, grandes perturbações, modelagem de sistemas.

ABSTRACT

Nowadays, society increasingly demands a greater and constant supply of electricity. To meet these requirements the utilities must ensure the reliability of the electric system, even in the most critical situations. The increasing loading, in recent years, boosted the interconnection between systems using electrical power transmission over long lines of high capacity. With this interconnection, the modeling of electric power systems has become more complex and the study on stability has become of vital importance, especially in the area of operation and planning of electric power systems.

During operation of electrical systems, disturbances of large and small scale can occur. These disturbances are responsible for cause oscillations in synchronous generators. When the system is subject to a

disturbance, operation is impaired, causing problems for society, and may even result in the shutdown of part or all of the interconnected system. To prevent this type of thing occurs it is necessary to carry out the analysis of stability for the various types of oscillations that can affect the electrical system.

One way to mitigate these oscillations is using *FACTS* devices (to english - 'Flexible Alternative Current Transmission Systems'). These devices are able to increase the capacity of power transmission and provide a quick control power flow in the line, increasing system reliability. This work performs transient stability analysis and the influence of *FACTS* devices in the dynamics of the electrical system against the occurrence of disturbances.

Keywords: electric power system, transient stability, *FACTS*, electromechanical oscillations, short-circuit, major disturbances, modeling systems.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Classificação de estabilidade em sistemas de elétricos de potência segundo o IEEE.[1]	2
2.1	Diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica [2].	6
2.2	Circuito equivalente da máquina síncrona trifásica [1].	6
2.3	Sistema de referência síncrona [1].	8
2.4	Diagrama de blocos de um sistema de excitação [3].	12
2.5	Diagrama de blocos de um sistema de regulação de tensão [3].	12
2.6	Diagrama de blocos de um sistema de regulação de velocidade [3].	13
2.7	Modelo π de linha de transmissão [1].	14
2.8	Fluxo de potência em um linha de transmissão de modelo π [1].	15
2.9	Rede de transmissão com um conjunto de n barramentos	17
3.1	Ponto de equilíbrio estável do sistema e sua vizinhança.	22
3.2	Ponto de equilíbrio instável.	22
3.3	Curva de potência	25
3.4	Ângulos das máquinas em relação ao tempo, comportamento estável [4].	27
3.5	Desvios das velocidades em relação ao tempo, comportamento estável [4].	27
3.6	Ângulos das máquinas em relação ao tempo, comportamento instável [4].	27
3.7	Desvios das velocidades em relação ao tempo, comportamento instável [4].	28
4.1	Perfil de tensão da rede em regime permanente [1].	33
4.2	Sistema com compensação <i>shunt</i> [5].	34
4.3	Diagrama fasorial do sistema com compensação <i>shunt</i> ideal [5].	34
4.4	Sistema com compensação série [5].	35
4.5	Diagrama fasorial do sistema com compensação série ideal [5].	36
4.6	Circuito trifásico de um controlador <i>VSC</i> [6].	39
4.7	Circuito de um controlador <i>SVC</i> do tipo <i>TCR - TSC</i> [6].	41
4.8	Esquema do capacitor chaveado a tiristores (<i>TSC</i>)[7].	41
4.9	Esquema do reator controlado a tiristores (<i>TCR</i>) [7].	42
4.10	Curva característica de tensão pela corrente do (<i>SVC</i>) [7].	43
4.11	Sistema de potência analisado para a modelagem do <i>SVC</i> [6]	43
5.1	Esquema elétrico unifilar do sistema máquina <i>vs</i> barramento infinito.	48
5.2	Circuito elétrico pré-falta do sistema no modelo clássico sem <i>FACTS</i>	49
5.3	Circuito elétrico em falta do sistema no modelo clássico sem <i>FACTS</i>	50

5.4	Circuito elétrico em pós-falta do sistema no modelo clássico sem <i>FACTS</i>	50
5.5	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.2s$ (modelo clássico sem <i>FACTS</i> - SMBI).	51
5.6	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.2s$ (modelo clássico sem <i>FACTS</i> - SMBI).	52
5.7	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.4s$ (modelo clássico sem <i>FACTS</i> - SMBI).	52
5.8	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.4s$ (modelo clássico sem <i>FACTS</i> - SMBI).	53
5.9	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	54
5.10	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	55
5.11	Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	56
5.12	Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	56
5.13	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	57
5.14	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	57
5.15	Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	58
5.16	Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem <i>FACTS</i> - SMBI).	58
5.17	Circuito elétrico pré-falta do sistema no modelo clássico com <i>FACTS</i>	59
5.18	Circuito elétrico em falta do sistema no modelo clássico com <i>FACTS</i>	60
5.19	Circuito elétrico pós-falta do sistema no modelo clássico com <i>FACTS</i>	61
5.20	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.55s$ (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	61
5.21	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.55s$ (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	61
5.22	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.70s$ (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	62
5.23	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.70s$ (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	63
5.24	Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 a 0.20 (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	64
5.25	Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 a 1.00 (modelo clássico com <i>FACTS</i> - SMBI).	64
5.26	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - SMBI).	66
5.27	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - SMBI).	66

5.28	Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	67
5.29	Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	68
5.30	Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	69
5.31	Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	69
5.32	Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	70
5.33	Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	70
5.34	Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 á 0.20 (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>). ..	71
5.35	Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 á 1.00 (modelo de dois eixos com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>). ..	71
5.36	Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 á 1.00 (os dois de máquinas síncronas com <i>FACTS</i> - <i>SMBI</i>).	72
5.37	Esquema elétrico unifilar do sistema de duas áreas de Prabah Kundur.	73
5.38	Diagrama trifilar do sistema de duas áreas de Prabah Kundur sem <i>SVC</i> no <i>SimPowerSystem</i> . ..	76
5.39	Diagrama trifilar da área 1 do sistema analisado no <i>SimPowerSystem</i>	76
5.40	Diagrama trifilar da área 2 do sistema analisado no <i>SimPowerSystem</i>	76
5.41	Gráfico dos ângulos das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem <i>FACTS</i>	77
5.42	Gráfico dos desvios de velocidades das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem <i>FACTS</i>	78
5.43	Gráfico das tensões nos barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem <i>FACTS</i>	78
5.44	Gráfico do fluxo de potência entre os barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem <i>FACTS</i>	79
5.45	Esquema elétrico unifilar do sistema de duas áreas de Prabah Kundur com <i>SVC</i> no <i>SimPowerSystem</i>	80
5.46	Diagrama trifilar do sistema de duas áreas de Prabah Kundur com <i>SVC</i> no <i>SimPowerSystem</i> . ..	80
5.47	Gráfico dos ângulos das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com <i>FACTS</i>	81
5.48	Gráfico dos desvios de velocidades das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com <i>FACTS</i>	81
5.49	Gráfico das tensões nos barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com <i>FACTS</i>	82
5.50	Gráfico do fluxo de potência entre os barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com <i>FACTS</i>	83
5.51	Gráfico da susceptância variavel do controlador <i>SVC</i> em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com <i>FACTS</i>	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

E'_q	variação da tensão no eixo de quadratura	[V]
E'_d	variação da tensão no eixo direto	[V]
E_{fd}	tensão de um regulador de tensão	[V]
V_q	tensão de quadratura	[V]
I_q	corrente de quadratura	[A]
V_d	tensão direta	[V]
I_d	corrente direta	[A]
r	resistência	[Ω]
x	reatância	[Ω]
x_q	reatância de quadratura	[Ω]
x_d	reatância direta	[Ω]
x'_q	reatância transitória de quadratura	[Ω]
x'_d	reatância transitória direta	[Ω]
T_{qo}	constante de tempo do eixo de quadratura	[s]
T_{do}	constante de tempo do eixo direto	[s]
T_e	torque elétrico	[Nm]
T_m	torque mecânico	[Nm]
P_e	potência elétrica	[kW]
P_m	potência mecânica	[kW]
δ	ângulo da máquina síncrona	[rad]
ω	desvio de velocidade	[rad/s]
J	momento de inércia	[kgm]
M	constante de inércia da máquina	[Ws ²]
D	constante de amortecimento da máquina	[Ns/m]
p	pares de polos magnéticos	
Z	impedância	[Ω]
Y	admitância	[siemens]
g	condutância	[siemens]
b	susceptância	[siemens]
Y_{bus}	matriz admitância das barras	[siemens]
E	fasor de tensão do barramento	[V]
S	potência aparente	[kVA]
P	potência ativa	[kW]
Q	potência reativa	[kVar]

Símbolos

V_k	tensão do Barramento k	[V]
P_k	potência ativa consumida pela carga do barramento k	[kW]
Q_k	potência reativa consumida pela carga do barramento k	[kVAr]
t	tempo	[s]
t_a	tempo de abertura	[s]
t_{cr}	tempo de crítico de abertura	[s]
δ_a	ângulo de abertura	[rad]
δ_{cr}	ângulo crítico de abertura	[rad]
δ^u	ângulo do ponto de equilíbrio instável	[rad]
δ_o	ângulo de referência	[s]
P_e^{prf}	potência elétrica pré-falta	[kW]
P_e^f	potência elétrica em falta	[kW]
P_e^{pf}	potência elétrica pós-falta	[kW]
x	deslocamento	[m]
v	velocidade	[m/s]
m	massa	[kg]
F	força	[N]
E_p	energia potência	[kJ]
E_c	energia cinética	[kJ]
A	área	[m ²]
M_T	constante de inércia ponderada	[Ws ²]
V_S	tensão do terminal S	[p.u]
V_R	tensão do terminal R	[p.u]
V	amplitude das tensões terminais	[p.u]
V_C	tensão controlada do compensador	[p.u]
X_L	reatância da linha	[p.u]
P_S	potência transferida entre os terminais	[p.u]
s	taxa de compensação série de reativos	
B_{SVC}	susceptância da rede com o controlador SVC	[p.u]
B_0	susceptância da rede em regime permanente	[p.u]
ΔB_{SVC}	susceptância controlada pelo SVC	[p.u]
x_i	reatância do barramento i	[p.u]
x_j	reatância do barramento j	[p.u]
x_{ij}	reatância entre os barramentos i e j	[p.u]
x_0	reatância constante da rede	[p.u]
b_{ij}	susceptância entre os barramentos i e j	[p.u]
b_0	susceptância constante da rede	[p.u]
W	função de controle	
u_{SVC}	lei de controle	
P_{ij}	fluxo de potência entre os barramentos i e j	[p.u]
P_{ij}^{SVC}	potência injetada na rede pelo controlador SVC	[p.u]

Siglas

<i>FACTS</i>	<i>Flexible Alternative Current Transmission Systems</i>
<i>MatLab</i>	<i>Matrix Laboratory</i>
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>CAI</i>	Critério das Áreas Iguais
<i>OMR</i>	Máquina como Referência
<i>COA</i>	Centro de Ângulo como Referência
<i>SMBI</i>	Sistema Máquina <i>vs</i> Barramento Infinito
<i>SPER</i>	Sistema Preservando a Estrutura da Rede
<i>SVC</i>	<i>Static VAr Compensator</i>
<i>VSC</i>	<i>Voltage Source Converter</i>
<i>TCSC</i>	<i>Thyristor Controlled Series Compensator</i>
<i>TCPST</i>	<i>Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer</i>
<i>STATCOM</i>	<i>Static synchronous Compensator</i>
<i>SSSC</i>	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
<i>IPFC</i>	<i>Interline Power Flow Controller</i>
<i>UPFC</i>	<i>Unified Power Flow Controller</i>
<i>GTO</i>	<i>Gate Turn-off</i>
<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>IGCT</i>	<i>Integrated Gates Commutated Thyrystors</i>
<i>FT</i>	<i>Fixed Capacitor</i>
<i>FR</i>	<i>Fixed Reactor</i>
<i>TSC</i>	<i>Thyristor Swiched Capacitor</i>
<i>TSR</i>	<i>Thyristor Swiched Reactor</i>
<i>TCR</i>	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
<i>PSS</i>	<i>Power System Stabilizer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	3
2	MODELAGEM DO SISTEMA.....	5
2.1	MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	5
2.1.1	SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	10
2.2	REDE DE TRANSMISSÃO	13
2.3	CARGAS	18
3	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	20
3.1	CONCEITOS BÁSICOS	20
3.1.1	PONTO DE EQUILÍBRIO	21
3.1.2	DEFINIÇÃO DE ESTABILIDADE	21
3.1.3	DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE.....	22
3.1.4	CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS	23
3.2	SINCRONISMO E ESTABILIDADE	26
3.2.1	MÁQUINA COMO REFERÊNCIA.....	28
3.2.2	CENTRO DE ÂNGULO COMO REFERÊNCIA	29
4	FLEXIBLE ALTERNATIVE CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS - <i>FACTS</i>.....	32
4.1	CONTROLE DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS POR DISPOSITIVOS <i>FACTS</i>	32
4.1.1	COMPENSADOR <i>Shunt</i>	33
4.1.2	COMPENSADOR SÉRIE	35
4.1.3	TIPOS DE CONTROLADORES <i>FACTS</i>	37
4.2	COMPENSADOR ESTATICO DE REATIVOS (<i>SVC - Static Var Compensator</i>).....	39
4.2.1	PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO	40
4.2.2	MODELO MATEMÁTICO DO <i>SVC</i>	42
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	47
5.1	SISTEMA MÁQUINA <i>vs</i> BARRAMENTO INFINITO	47
5.1.1	MODELO CLÁSSICO SEM <i>FACTS</i>	49

5.1.2	MODELO DE DOIS EIXOS SEM <i>FACTS</i>	53
5.1.3	MODELO CLÁSSICO COM <i>FACTS</i>	59
5.1.4	MODELO DE DOIS EIXOS COM <i>FACTS</i>	64
5.2	SISTEMA PRESERVANDO A ESTRUTURA DA REDE	73
5.2.1	SISTEMA DE DUAS ÁREAS DE KUNDUR SEM O CONTROLADOR <i>SVC</i>	75
5.2.2	SISTEMA DE DUAS ÁREAS DE KUNDUR COM CONTROLADOR <i>SVC</i>	79
6	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
	ANEXOS.....	89
I	ALGORITMO FLUXO DE POTÊNCIA - MÉTODO NEWTON-RAPHSON	90
I	DIAGRAMA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA ELABORADA NO <i>SimPowerSistem</i>	92

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Para atender a atual demanda de energia elétrica exigida pela sociedade, os sistemas elétricos de potência tem se tornado cada vez mais complexos. Os estudos e as análises desses sistemas são feitos levando em conta as distâncias entre os consumidores e as unidades geradoras, a variação de carga em relação ao horário e dia da semana e a confiabilidade em casos de situações críticas. Esses fatores são estudados com o intuito de fornecer energia elétrica para os consumidores de maneira adequada e com os menores custos possíveis [8].

Um dos principais requisitos para o fornecimento de energia elétrica é a confiabilidade do sistema, pois as cargas prioritárias e parte das cargas residenciais consomem energia continuamente. Para aumentar a confiabilidade torna-se cada vez mais necessário a interligação entre os sistemas, pois dessa maneira a capacidade de manobra de energia de diversificadas fontes para variados tipos de cargas é expandida, fazendo com que a complexidade do sistema aumente. Entretanto, a transferência de energia entre diferentes sistemas faz com que as perturbações que ocorra em um sistema afetem outros sistemas interligados. Com isso, o estudo de estabilidade tornou-se de vital importância para a operação e planejamento de sistemas de potência.

As perturbações são fatores externos que alteram o comportamento padrão do sistema, como por exemplo, variações de carga nos barramentos, perda de componentes do sistema e curtos-circuitos nas linhas de transmissão, nas barras e nos equipamentos (geradores, transformadores). Em regime permanente o sistema elétrico opera de maneira padrão em um determinado ponto de equilíbrio. Caso ocorra alguma perturbação na rede, o sistema pode deixar de operar no ponto de equilíbrio até que as oscilações sejam eliminadas. Após a eliminação das perturbações, o que definirá se o sistema voltará a operar em um ponto de equilíbrio ou não é a sua estabilidade [2].

Um sistema é dito estável quando, para uma dada condição inicial de operação, é capaz de recuperar um estado de equilíbrio operacional após ter sido submetido a perturbações físicas, tendo todas as suas grandezas dentro dos limites operacionais, de modo que praticamente todo o sistema continue intacto. No caso do sistema não ser estável ele é dito instável, não podendo operar. Como o estudo de estabilidade possui uma alta complexidade, existem diferentes situações envolvendo sua análise. Com intuito de tornar

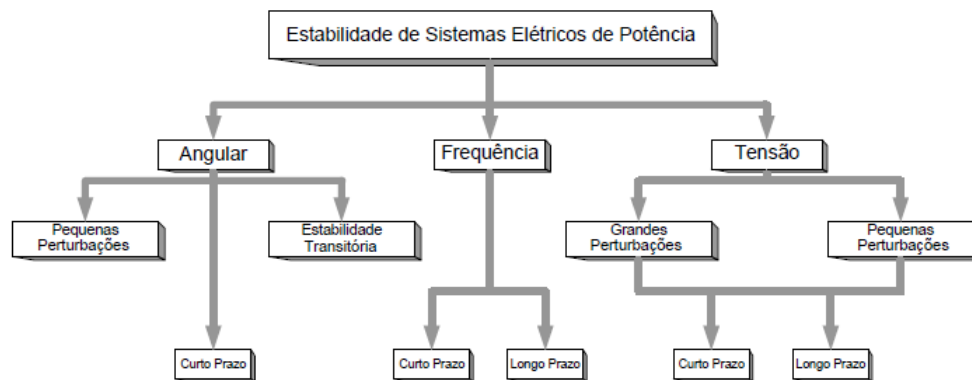


Figura 1.1: Classificação de estabilidade em sistemas de elétricos de potência segundo o IEEE.[1]

a análise mais viável, os engenheiros classificaram os problemas de estabilidade em relação as variáveis de interesse, o intervalo de tempo de análise e ao tipo físico e intensidade da perturbação do sistema. A Figura (1.1), mostra essa classificação segundo o IEEE [1].

Neste trabalho, o foco do estudo está na estabilidade angular, mais especificamente na estabilidade transitória, que é caracterizada pelas grandes perturbações. A estabilidade angular é definida como a capacidade dos ângulos das máquinas síncronas permanecerem próximos após uma perturbação no sistema, essa característica é denominada de sincronismo. A análise de estabilidade transitória é uma parte específica da estabilidade angular, onde o foco está no estudo do sincronismo do sistema após uma grande perturbação, como por exemplo, um curto-circuito na linha de transmissão ou a perda de gerador. Caso as oscilações angulares de alguns geradores aumentem muito e ocasionem a perda de sincronismo com as outras máquinas síncronas, o que causa a instabilidade do sistema.

Um sistema elétrico de potência sujeito a uma perturbação possui seus pontos de equilíbrio fora da região de operação, caso o problema persista, pode implicar no desligamento de uma parte ou de todo o sistema interligado. Isso pode acarretar problemas para os operadores, e consequentemente para população. Uma maneira de atenuar essas oscilações eletromecânicas que afetam o sistema é utilizando equipamentos *FACTS*. Através desses equipamentos a confiabilidade do sistema é aumentada, pois eles aumentam a capacidade de transmissão de potência realizando um controle rápido no fluxo de potência na rede.

1.2 Definição do problema

Fatores como curto-circuito na rede de transmissão e desligamento de unidades geradoras podem ocasionar quedas no fornecimento de energia elétrica em parte do sistema interligado. Isso ocorre quando a confiabilidade do sistema elétrico não é o suficiente para suportar uma dessas grandes perturbações, o que torna o sistema instável. Para o estudo da confiabilidade dos sistemas sujeitos a grandes perturbações é feita a análise de estabilidade transitória.

Quando grandes perturbações atingem o sistema, o equilíbrio entre a potência elétrica gerada e a potência mecânica de entrada é rompida de maneira brusca, principalmente nas máquinas síncronas mais próximas da falta, em consequência os rotores das máquinas começam a acelerar ou desacelerar. No caso

das máquinas acelerarem juntas, mantendo o sincronismo, o sistema se mantém estável. Entretanto se uma das máquinas acelerar mais que as outras, ocorre a perda de sincronismo, tornando sistema será instável. Deve-se destacar que a estabilidade do sistema é influenciada pela condição de operação inicial, a gravidade da perturbação e outras não linearidades da rede. [2]

1.3 Objetivos do trabalho

Neste trabalho é feita a modelagem computacional dos principais componentes do sistema elétrico de potência, que são: a máquina síncrona, a rede de transmissão e as cargas. Essa modelagem é feita através de rotinas no software *MatLab*, com intuito de simular o comportamento do sistema sujeito a grandes perturbações.

A simulação computacional é feita para realizar a análise de estabilidade transitória e determinar as condições e os valores de algumas das grandezas que influenciam a estabilidade do sistema. Com isso é possível determinar a confiabilidade do sistema a partir da região de estabilidade e dos pontos críticos. O objetivo desse trabalho é analisar a influência dos equipamentos *FACTS* na dinâmica do sistema sujeito a grandes perturbações, isso é feito com intuito de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico de potência.

1.4 Apresentação do manuscrito

Na primeira parte do trabalho sua estrutura é dividida basicamente nos seguintes capítulos:

- Introdução
- Modelagem do Sistema
- Estabilidade Transitória
- Flexible Alternative Current Transmission Systems - *FACTS*
- Simulações e Resultados Experimentais
- Conclusões

O Capítulo 2 apresenta a parte referente a Modelagem do Sistema. Nele são mostrados o conjunto de equações diferenciais e algébricas que caracterizam e definem os componentes do sistema elétrico de potência. A modelagem é feita para a máquina síncrona, a rede de transmissão e as cargas do sistema.

A referência ao estudo de Estabilidade Transitória é mostrado no Capítulo 3. Nesse capítulo apresenta-se uma série de conceitos básicos relacionados a estabilidade do sistema, tais como, a definição de ponto de equilíbrio e a determinação da estabilidade. Em seguida são apresentados métodos para a análise de estabilidade transitória a partir dos conceitos de sincronismo do sistema elétrico. Por último, é mostrado como funciona o sistema de excitação de um gerador síncrono, que é utilizado para aumentar a estabilidade e a segurança da máquina.

A base teórica sobre os "Flexible Alternative Current Transmission Systems" é apresentada no Capítulo 4. Essa base teórica mostra as características, as funcionalidades e os tipos de controladores *FACTS*. Um estudo é realizado, de maneira mais específica, no Compensador Estático de Reativos (*SVC* - Static VAR Compensator), que é um dispositivo *FACTS* do tipo *shunt*, onde são mostrados os princípios de operação e a construção do modelo do controlador. Com esse estudo é possível analisar o comportamento de um sistema de potência que utiliza controle por *FACTS*, verificando a influência do controlador na estabilidade do sistema analisado.

O Capítulo 5 apresenta as Simulações e os Resultados Experimentais obtidos no trabalho. Esse capítulo mostra a estrutura, a lógica e a maneira de como foi feita a simulação do comportamento de alguns exemplos de sistemas elétricos. Essas simulações são realizadas com intuito de obter resultados para a análise da estabilidade transitória e o estudo da influência que os equipamentos *FACTS* desempenham na confiabilidade no sistema elétrico de potências. A Conclusão dos resultados obtidos no trabalho é feita no Capítulo 6. Logo após são indicados as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do trabalho.

Capítulo 2

Modelagem do Sistema

Um dos principais objetivos propostos por esse trabalho é realizar uma análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potências. Para isso, torna-se necessário elaborar um modelo matemático para cada tipo de componente desse sistema. A modelagem matemática é feita a partir de conjuntos de equações diferenciais e algébricas, sendo considerada uma série de condições e simplificações para o modelo.

O sistema elétrico de potência é basicamente composto por três tipos de componentes: as máquinas síncronas, as redes de transmissão e as cargas elétricas. Este capítulo mostra como é feita essa modelagem matemática para cada um dos componentes já citados.

2.1 Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas exercem muitas funções dentro de um sistema elétrico de potência. As principais fontes de energia elétrica são fornecidas a partir de geradores síncronos. Todas as cargas do sistema são acionadas através de motores síncronos. Além disso, em alguns casos utilizam-se máquinas ou compensadores síncronos para realizar a compensação de potência reativa e o controle da tensão da rede. O principal problema que pode ocorrer com esses tipos de máquinas é a perda do sincronismo [2].

Basicamente, dois elementos essenciais definem fisicamente as máquinas síncronas: o campo e a armadura. O enrolamento de campo carrega uma corrente que produz um campo magnético, induzindo uma tensão alternada no enrolamento da armadura. Com isso, verifica-se que, em uma máquina síncrona trifásica, a armadura é um conjunto de enrolamentos trifásicos no estator e o campo é um conjunto de enrolamentos ligados ao rotor. Além disso, um conjunto de enrolamentos de amortecedores normalmente são utilizados para amortecer possíveis variações que podem ocorrer devido a perturbações na máquina [2].

O esquema de uma máquina síncrona trifásica de dois polos é mostrado a partir do diagrama logo abaixo na Figura (2.1). Já a Figura (2.2) mostra o circuito equivalente trifásico da máquina.

Para o desenvolvimento das equações da máquina síncrona, as seguintes suposições foram consideradas [2]:

- O enrolamento do estator é distribuído senoidalmente ao longo do entreferro mantendo um efeito mútuo com o respectivo rotor.
- As ranhuras do estator não causam variações consideráveis da indutância do rotor com a posição do rotor.
- A histerese magnética é desprezada.
- Os efeitos da saturação magnética são desprezados.

Levando em conta as suposições citadas e determinadas simplificações, é possível analisar de maneira mais adequada as máquinas síncronas, obtendo assim um conjunto de equações diferenciais que caracterizem o sistema. Com isso, é possível descrever um modelo matemático para a máquina de maneira se possa simular o seu comportamento, possibilitando examinar o seu desempenho adequadamente.

O conjunto de equações que serão utilizados para análise são do denominado modelo de dois eixos de máquina síncrona. O modelo de dois eixos considera a variação da tensão transitória no eixo de quadratura (E'_q) e no eixo direto (E'_d). Com isso, o conjunto de equações que fazem a modelagem do comportamento elétrico da máquina é compostos pelas duas diferenciais (2.1) e as duas algébricas (2.2) [2].

$$\begin{aligned}
 \dot{E}'_{qi} &= \frac{1}{T'_{do_i}} [E_{fd_i} - E'_{qi} (x_{di} - x'_{di}) I_{di}] \\
 \dot{E}'_{di} &= \frac{1}{T'_{qo_i}} [E'_{di} (x_{qi} - x'_{qi}) I_{di}] \\
 V_{qi} &= E'_{qi} - r_i I_{qi} + x'_{di} I_{di} \\
 V_{di} &= -r_i I_{di} + x'_{qi} I_{qi}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
 V_{qi} &= E'_{qi} - r_i I_{qi} + x'_{di} I_{di} \\
 V_{di} &= -r_i I_{di} + x'_{qi} I_{qi}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Nessas equações, tem-se que o E_{fd} é a tensão de campo. A corrente I_d e a tensão V_d são componentes referentes ao eixo direto (d), enquanto a corrente I_q e a tensão V_q são componentes referentes ao eixo de quadratura (q). As reatâncias transitórias x'_d e x'_q são, respectivamente, referentes aos eixo direto e de quadratura, enquanto r é a resistência para uma fase do estator. Todas essas variáveis e constantes estão referidas ao índice i que indica a qual gerador elas pertencem [1].

Além das propriedades elétricas, é necessário equacionar as propriedades mecânicas para a análise do comportamento dinâmico da máquina. Com isso, as relações eletromecânicas de conversão de energia do sistema de potência são estabelecidas. Estas relações são referentes ao movimento rotacional da máquina, onde é estabelecido um sistema de referência, como mostrado na Figura (2.3).

Como a diferença entre os ângulos de referência está relacionado a sua fase, que é uma constante, verifica-se que em seu comportamento estável ambas as acelerações angulares são iguais, o que caracteriza o sistema de referência girante como um sistema inercial. Com isso, observa-se que a equação diferencial do ângulo δ_m em relação ao tempo também é a mesma que descreve o do ângulo θ_m [1].

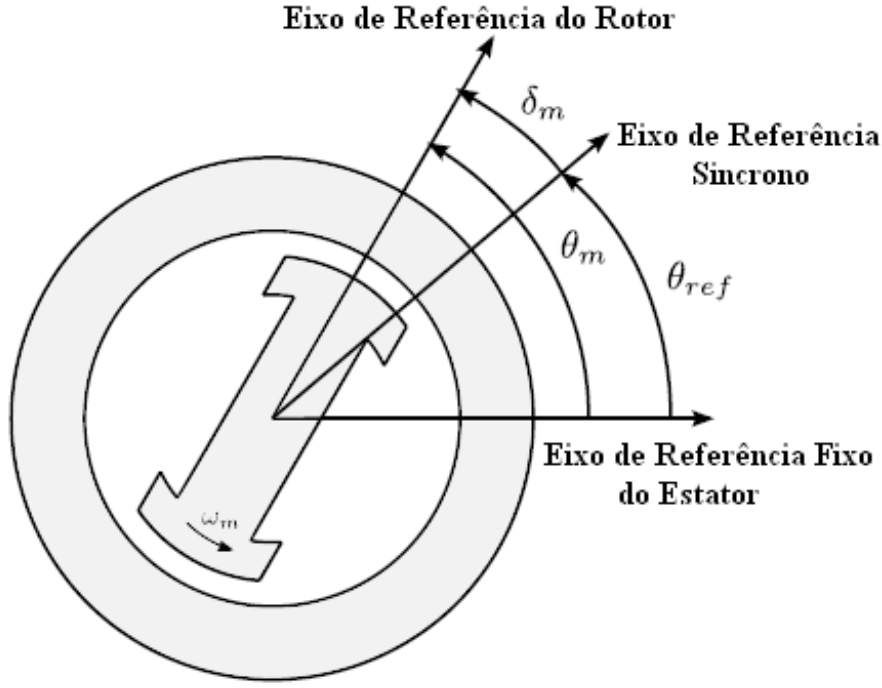


Figura 2.3: Sistema de referência síncrona [1].

Os efeitos mecânicos da máquina síncrona se expressam através das interações entre os torques elétricos T_e e mecânicos T_m exercidos sobre o mecanismo. A partir da 2ª lei de Newton para movimentos rotacionais, a seguinte equação para caracterizar mecanicamente a máquina é estabelecida:

$$J\dot{\omega}_{m_i} = T_{m_i} - T_{e_i} \quad (2.3)$$

Considerando os efeitos de enrolamento de amortecimento na máquina na Equação (2.3), obtém-se a Equação (2.4) mostrada abaixo:

$$J\dot{\omega}_{m_i} = T_{m_i} - T_{e_i} - T_{am_i} \quad (2.4)$$

Nos sistemas elétricos é mais conveniente trabalhar com as grandezas em potência do que com o conjugado. Como a potência está relacionada diretamente a velocidade angular e ao conjugado, como mostrado na Equação (2.5), tem-se a seguinte expressão na Equação (2.6):

$$P_i = \omega_i T_i \quad (2.5)$$

$$J\omega_{m_i}\dot{\omega}_{m_i} = P_{m_i} - P_{e_i} - \omega_{m_i}T_{am_i} \quad (2.6)$$

O termo $J\omega$ é momento angular M , denominado como a constante de inércia da máquina. Com isso, determina-se a seguinte equação diferencial :

$$\dot{\omega}_{m_i} = \frac{1}{M_i} [P_{m_i} - P_{e_i} - \omega_{m_i} T_{(am)_i}] \quad (2.7)$$

Como na análise de estabilidade transitória o interesse principal é a variação do ângulo elétrico, busca-se relacionar o ângulo elétrico com o ângulo mecânico através do número de pares de pólos magnéticos (p) da máquina [1].

$$\delta_{e_i} = p_i \delta_{m_i} \quad (2.8)$$

A partir das equações anteriores (2.5), (2.6) e (2.7), o conjunto de equações que determinam o comportamento mecânico da máquina síncrona é definido. Esse conjunto é denominado equação de *swing* (balanço). A equação de *swing* é composta por duas equações diferenciais como mostrado na Equação (2.9) [1].

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} [P_{m_i} - P_{e_i} - \omega_{m_i} T_{am_i}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Para as análises mais simplificadas de sistemas de potências, na maioria das vezes, o modelo clássico de máquina síncrona é utilizado. Isso ocorre pelo fato do modelo ser composto por duas equações diferenciais, sendo portanto um modelo de 2ª ordem. As equações diferenciais do modelo clássico são apresentados abaixo [9].

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} \left[P_{m_i} - \frac{E_i V_i}{x_{eq_i}} \sin(\delta_i - \theta_i) - \omega_{m_i} T_{am_i} \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Onde, E_i é a força eletromotriz do gerador i , V_i é a tensão do barramento no qual esta ligado o gerador i e X_{eq_i} é a reatância equivalente entre o gerador i e o seu barramento.

Juntando as conjunto de equações da parte elétrica com a equação de swing é possível determinar o comportamento eletromecânico da máquina síncrona, para o modelo de dois eixo. Esse é um modelo de gerador síncrono de 4ª ordem, composto por quatro equações diferenciais e duas equações algébricas. As equações que definem o modelo de dois eixos de máquina síncrona são mostradas a abaixo, onde (2.11) são equações diferenciais e (2.12) são as equações algébricas [9].

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} [P_{m_i} - E'_{q_i} I_{q_i} - (x_{d_i} - x'_{d_i}) I_{d_i} I_{q_i} - \omega_{m_i} T_{am_i}] \\ \dot{E}'_{q_i} &= \frac{1}{T'_{do_i}} [E_{fd_i} - E'_{q_i} (x_{d_i} - x'_{d_i}) I_{d_i}] \\ \dot{E}'_{d_i} &= \frac{1}{T'_{qo_i}} [E'_{d_i} (x_{q_i} - x'_{q_i}) I_{d_i}] \\ V_{q_i} &= E'_{q_i} - r_i I_{q_i} + x'_{d_i} I_{d_i} \\ V_{d_i} &= -r_i I_{d_i} + x'_{q_i} I_{q_i} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} V_{q_i} &= E'_{q-r_i I_{q_i} + x'_{d_i} I_{d_i}} \\ V_{d_i} &= -r_i I_{d_i} + x'_{q_i} I_{q_i} \end{aligned} \quad (2.12)$$

As equações algébricas são utilizadas para obter expressões relacionadas as correntes de quadratura e direta da máquina, que serão substituídas nas equações diferenciais. Isso é feito com intuito de obter um modelo utilizando apenas equações diferenciais, o que facilita a resolução do sistema.

No modelo de 4ª ordem de máquina síncrona são considerados fatores como amortecimento mecânico e resistências internas. Entretanto, em simulações normalmente esses fatores são desconsideradas, permitindo simplificar o sistema e facilitar a análise. Considerando a tensão V_i e o ângulo de fase θ_i do barramento ligado ao gerador i sendo constantes, e a resistência interna do gerador desprezível, o modelo de dois eixos máquina síncrona será expresso pelas equações diferenciais de (2.13) á (2.16) [9, 1].

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} \left[P_{m_i} - \left(\frac{1}{x'_{d_i}} \right) E'_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - \left(\frac{1}{x'_{q_i}} \right) E'_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{x_{d_i} - x'_{d_i}}{2x'_{d_i} x'_{q_i}} \right) V_i^2 \sin(\delta_i - \theta_i) - \omega_{m_i} T_{am_i} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\dot{E}'_{q_i} = \frac{1}{T'_{d_{oi}}} \left[E_{fd_i} - \left(\frac{x_{d_i}}{x'_{d_i}} \right) E'_{q_i} + \left(\frac{x_{d_i} - x'_{d_i}}{x'_{d_i}} \right) V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \right] \quad (2.15)$$

$$\dot{E}'_{d_i} = \frac{1}{T'_{q_{oi}}} \left[\left(\frac{x_{q_i}}{x'_{q_i}} \right) E'_{d_i} + \left(\frac{x_{q_i} - x'_{q_i}}{x'_{q_i}} \right) V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \right] \quad (2.16)$$

2.1.1 Sistemas de Excitação

O controle de excitação é um sistema desenvolvido para máquinas síncronas com intuito de evitar a perda de sincronismo da máquina, com isso a confiabilidade do sistema de potência é aumentada. Esse sistema de excitação do gerador síncrono realiza o controle da distribuição da potência reativa entre as máquinas ligadas ao sistema, além de aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas que podem afetar o gerador. Na parte de segurança, o controle de excitação estabelece o limite de segurança para as máquinas, com objetivo de evitar danos aos componentes do gerador síncrono que podem ser causados por sobrecorrente e altos fluxos magnéticos, além disso, são estabelecidos limites inferiores dessas grandezas para uma boa operação da máquina [10].

A função básica do sistema de excitação é fornecer uma fonte de corrente contínua para a excitação do enrolamento campo de um gerador síncrono. Através do controle da corrente de campo do gerador, a tensão terminal da máquina também é controlada, de forma que se mantenha constante. Além de ser

responsável pela tensão terminal do gerador, o sistema de excitação também é responsável pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada. A Figura (2.4) mostra o diagrama de blocos funcional para um sistema de excitação [10].

Os principais componentes do sistema de excitação para a realização de seu controle são a excitatriz e o regulador de tensão, sendo em alguns casos utilizados outros controles para auxiliar o sistema. Até pouco tempo, a excitatriz da maioria dos sistemas era um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador principal. Nos sistemas atuais, devido a eletrônica de potência, começaram a utilizar retificadores estáticos e tiristores para realizar controle das excitatrizes. Desta forma, as excitatrizes atuais operam de maneira mais rápida e exigem menos manutenções, substituindo dessa forma os sistemas mais antigos [3].

Levando em conta o tipo de excitatriz, os sistemas de excitação possuem as seguintes configurações mais típicas:

- Sistemas Clássicos
- Sistemas com Excitatriz de Campo Rotativo e Retificadores Estáticos
- Sistemas de Excitação sem Escovas
- Sistemas de Excitação Estática Utilizando Tiristores
- Sistemas de Excitação sem Escovas Utilizando Tiristores

Os controladores auxiliares são dispositivos que incluem funções complementares ao sistema de excitação, com objetivo de aumentar a estabilidade da máquina. Os principais controladores auxiliares, geralmente, têm as funções de aumentar o amortecimento do sistema de controle, realizar a compensação de corrente reativa e estabelecer limites de sobre e sub-excitação. O regulador de velocidade e o Estabilizadores de Sistemas de Potência (*Power System Stabilizers (PSS)*) são exemplos de controladores auxiliares que podem contribuir para o sistema de excitação e a confiabilidade do sistema de potência. O *Power System Stabilizers* é um dispositivo que proporciona um controle adicional para o sistema automático do regulador de tensão ou do sistema turbomáquina de uma unidade geradora, sendo um dos melhores métodos de otimização da estabilidade transitória do sistema [3].

2.1.1.1 Regulador de Tensão

O regulador de tensão é o dispositivo que tem a função de controlar a corrente de campo da saída da excitatriz de forma que a tensão terminal e a potência reativa variem de acordo com as necessidades do gerador síncrono. Esse controle da corrente de campo é feito de maneira rigorosa para manter o gerador em sincronismo com o sistema, mantendo o sistema estável. Caso o sistema seja sujeito a condições de curto-circuito, o regulador aumenta a excitação do gerador para mante-lo em sincronismo com as demais máquinas, aumentando a confiabilidade do sistema. Além de atuar em grandes perturbações, o regulador de tensão amortece as oscilações de baixa frequência da rede, reduzindo os problemas de pequenas perturbações. Quando as máquinas de um sistema operam em paralelo em um mesmo barramento, o regulador atua realizando a divisão de potência reativa entre essas máquinas [3].

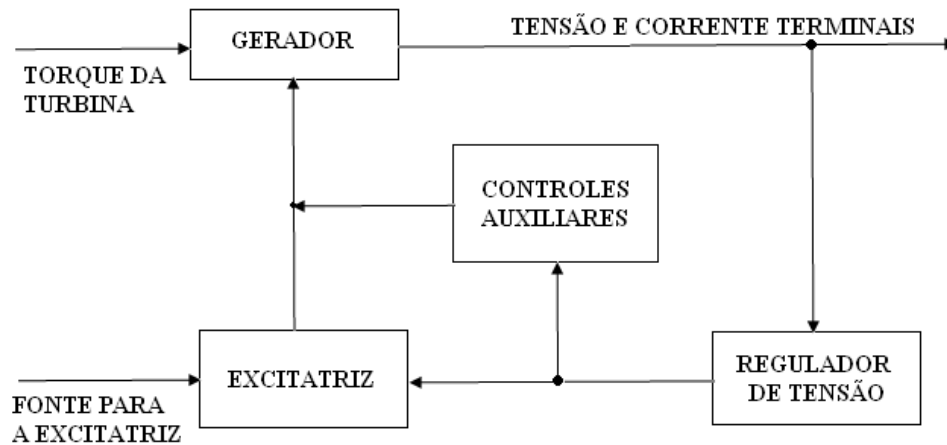


Figura 2.4: Diagrama de blocos de um sistema de excitação [3].

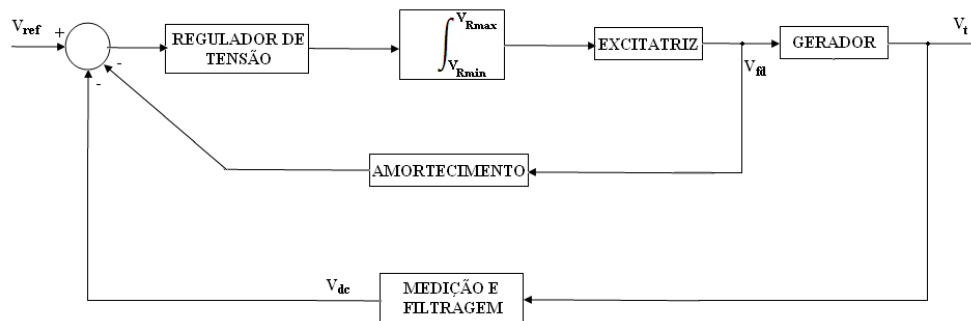


Figura 2.5: Diagrama de blocos de um sistema de regulação de tensão [3].

No início do século passado, a regulação de tensão era realizada por meio de um operador, que monitorava o comportamento da tensão terminal e executava os ajustes necessários através do reostato de campo da excitatriz. Nos sistemas atuais, o regulador de tensão é um dispositivo que monitora a tensão terminal do gerador e realiza as correções necessárias através do controle da corrente de campo gerada pela excitatriz, isso é feito até a tensão terminal do gerador se manter constante. A Figura (2.5) mostra o diagrama de blocos funcional de um sistema de regulação automática de tensão [3].

Máquinas como os hidro-geradores, turbo-geradores e compensadores síncronos, quando são sujeitos a grandes variações de carga necessitam do uso do regulador de tensão, sendo em alguns casos indispensáveis para manter a estabilidade do sistema. A qualidade de um regulador de tensão é influenciada pela sua faixa de tensão na qual não é esperada nenhuma resposta, essa faixa é denominada de zona morta. Dependendo da zona morta do regulador, a sensibilidade pode ser insuficiente para permitir resposta a pequenas variações de tensão, podendo perder algumas de suas funções [2, 11].

2.1.1.2 Regulador de Velocidade

O regulador de velocidade realiza o controle da velocidade de rotação da turbina, com intuito de controlar a frequência da tensão terminal do gerador síncrono acoplado a essa turbina. Esse controle de ve-

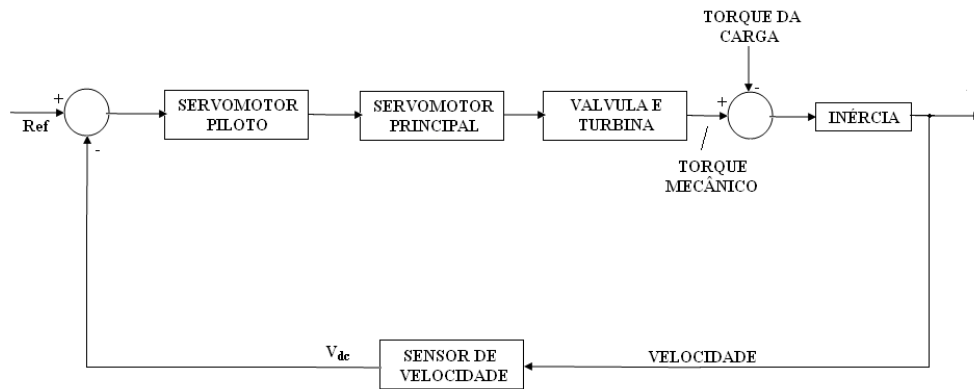


Figura 2.6: Diagrama de blocos de um sistema de regulação de velocidade [3].

locidade é feito para manter a frequência da tensão terminal constante, desta forma, o gerador mantém o sincronismo com o sistema, podendo ser ligado diretamente à rede. Para que a velocidade seja mantida constante, a potência gerada deve ser igual a potência das cargas. Como a potência gerada é função direta da vazão da turbinada, que por sua vez também depende da velocidade de rotação, o regulador também pode realizar um controle sobre a potência ativa gerada [3].

Para um conjunto turbina-gerador, um regulador de velocidade geralmente é composto por um sensor de velocidade, amplificadores de deslocamento e amplificadores de força. A saída do sensor de velocidade é um deslocamento proporcional à velocidade do conjunto turbina-gerador. Os amplificadores de força e de deslocamento são utilizados para aumentar os sinais de força e deslocamento recebidos pelo sensor. A Figura (2.6) mostra o diagrama de blocos funcional de um sistema que regula a velocidade de um conjunto turbina-gerador [3].

Os reguladores de velocidade mais atuais são os eletro-hidráulicos, que são resultantes da evolução dos reguladores mais antigos, os mecânico-hidráulicos. Esses reguladores mais antigos utilizavam massas rotativas, que atuam do sistema hidráulico com intuito de abrir ou fechar as válvulas de admissão das máquinas motrizes dos geradores. Os reguladores eletro-hidráulicos utilizam diversos sensores e dispositivos eletrônicos no lugar dos dispositivos mecânicos, entretanto, a parte hidráulica se mantém basicamente a mesma dos reguladores antigos. Com os diferentes tipos de configurações e modos de operação dos reguladores de velocidade, permite que eles possam ser classificados de duas maneiras: isócronos ou com queda livre [11].

2.2 Rede de Transmissão

A rede de transmissão é o componente do sistema elétrico de potência responsável por transportar a energia elétrica gerada pelas centrais geradoras para as cargas do sistema. Normalmente a rede é composta por equipamentos de manobra, equipamentos de segurança, compensadores de reativos e principalmente por transformadores e condutores elétricos, que são dispostos em determinados arranjos [2];

Para a análise do comportamento de todo o sistema elétrico de potência, é necessário determinar um modelo matemático para a rede de transmissão. Assim como foi feito para as máquinas síncronas, é

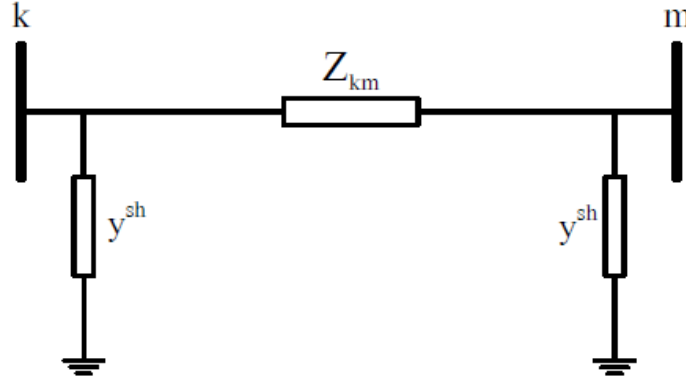


Figura 2.7: Modelo π de linha de transmissão [1].

necessário obter um conjunto de equações que definam fisicamente a rede para poder modelá-la. Também é preciso definir as considerações e simplificações que serão utilizados na modelagem da rede [12].

Nesse modelo é considerado que a rede opera em regime permanente senoidal, essa modelagem se justifica uma vez que as dinâmicas eletromagnéticas são muito mais rápidas que as dinâmicas eletromecânicas [1]. Logo, para a análise de estabilidade angular, as dinâmicas de rede serão desprezadas, simplificando o modelo analisado. Essas considerações caracterizam o modelo π de linha de transmissão, que é mostrado na Figura (2.7) [1].

O modelo π é representado por parâmetros concentrados, como a impedância série Z_{km} e a admitância paralela em shunt Y_{sh} , e normalmente são expresso em unidade por km. A impedância série pode ser expressa em termos da resistência série r_{km} e da reatância série x_{km} , como mostrada na Equação (2.17) [1].

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.17)$$

A admitância serie é a inversa da impedância serie, e pode ser expresso em termos da condutância g_{km} e da susceptância b_{km} da linha, como mostrada na Equação (2.18). O cálculo da condutância e da susceptância são expressos na Equação (2.19) mostrada a seguir:

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.18)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} g_{km} &= \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \\ b_{km} &= -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

As equações citadas permitem obter os parâmetros necessário para realizar o cálculo do fluxo de potência na linha de transmissão. Os principais parâmetros são a condutância e a susceptância, tanto serie

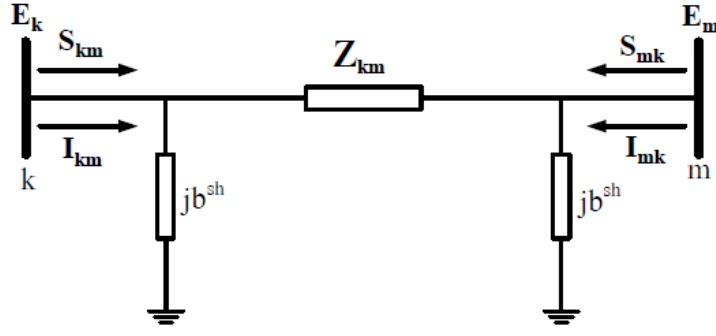


Figura 2.8: Fluxo de potência em um linha de transmissão de modelo π [1].

quanto *shunt*. Para esse modelo da rede considera-se dois barramentos, k e m . A Figura (2.8) mostra o fluxo de potência e o seu sentido em uma linha de transmissão de modelo π [1, 8].

Verifica-se no modelo que a condutância *shunt* (g_{sh}) é desprezada. A partir do modelo e das fórmulas citadas é possível determinar a matriz de admitância da linha de transmissão, em que a expressão é mostrada na Equação (2.20):

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} (g_{km} + jb_{km}) + jb^{sh} & -(g_{km} + jb_{km}) \\ -(g_{km} + jb_{km}) & (g_{km} + jb_{km}) + jb^{sh} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

A matriz de admitância \mathbf{Y} é utilizada para determinar a corrente a partir da 1ª lei de Ohm, mostrada na (2.20). Como no modelo de rede existem dois barramentos a expressão é composta por matrizes, como pode ser visualizada na Equação matricial (2.22) [1].

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}\mathbf{E} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} I_{km} \\ I_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (g_{km} + jb_{km}) + jb^{sh} & -(g_{km} + jb_{km}) \\ -(g_{km} + jb_{km}) & (g_{km} + jb_{km}) + jb^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ E_m \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

As tensões \mathbf{E}_k e \mathbf{E}_m são os fasores de tensão das barras k e m , respectivamente. A Equação (2.23) mostra a expressão para essas tensões fasoriais.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_k &= E_k e^{j\theta_k} \\ \mathbf{E}_m &= E_m e^{j\theta_m} \end{aligned} \quad (2.23)$$

A partir das correntes e tensões da rede pode-se obter a potência aparente a partir da Equação (2.24). Aplicando as Equações (2.21) e (2.22) na (2.23), obtêm-se a Equação matricial (2.25) que é mostrada a seguir:

$$\mathbf{S} = \mathbf{EI}^* \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} S_{km} \\ S_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_k e^{j\theta_k} & 0 \\ 0 & E_m e^{j\theta_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (g_{km} - jb_{km}) - jb^{sh} & -(g_{km} - jb_{km}) \\ -(g_{km} - jb_{km}) & (g_{km} - jb_{km}) - jb^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k e^{j\theta_k} \\ E_k e^{j\theta_k} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

A potência aparente é composta pelas potências ativa e reativa, como mostrado na Equação (2.26). Aplicando essa equação para o modelo a Equação matricial (2.27) é estabelecida [12].

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q} \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} S_{km} \\ S_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{km} \\ P_{mk} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} Q_{km} \\ Q_{mk} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Resolvendo a Equação matricial (2.24) e realizando uma identidade com Equação matricial (2.27). Com isso, determina-se as expressões das potências ativas, P_{km} e P_{mk} , e das reativas, Q_{km} e Q_{mk} , como mostradas das Equações matriciais (2.28) e (2.29), respectivamente. A partir dessas expressões, é possível determinar o fluxo de potência ativa e reativa na linha de transmissão [11, 1].

$$\begin{bmatrix} P_{km} \\ P_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{km}E_k^2 - g_{km}E_kE_m \cos(\theta_{km}) - b_{km}E_kE_m \sin(\theta_{km}) \\ g_{km}E_m^2 - g_{km}E_mE_k \cos(\theta_{km}) + b_{km}E_mE_k \sin(\theta_{km}) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{km} \\ Q_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{km} + b^{sh})E_k^2 - b_{km}E_kE_m \cos(\theta_{km}) - g_{km}E_kE_m \sin(\theta_{km}) \\ -(b_{km} + b^{sh})E_m^2 - b_{km}E_mE_k \cos(\theta_{km}) - g_{km}E_mE_k \sin(\theta_{km}) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Sendo: $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$

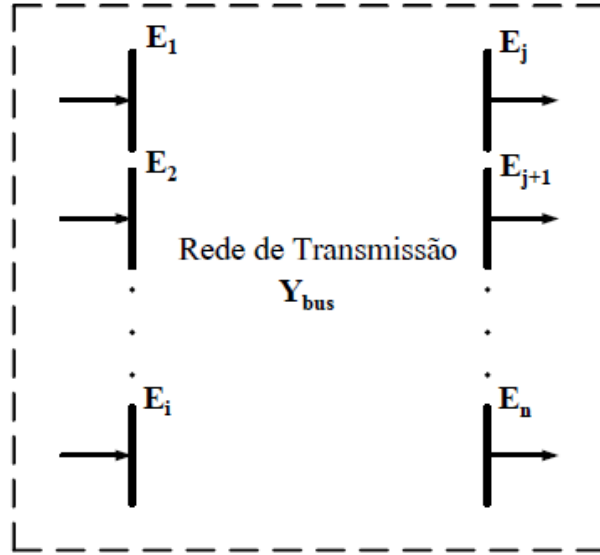


Figura 2.9: Rede de transmissão com um conjunto de n barramentos

Um sistema mais complexo formado por n barramentos é considerado, sendo que a entrada de potência nas barras da rede pode ser calculada através da expressão (2.30), como mostrada abaixo:

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{E}) (\mathbf{Y}_{\text{BUS}} \mathbf{E})^* \quad (2.30)$$

A matriz \mathbf{Y}_{BUS} é admitância de todo o sistema, como mostrado na Figura (2.9) enquanto o vetor \mathbf{E} é composto pelas tensões dos n barramentos do sistema. Utilizando as equações citadas anteriormente, sendo a base a Equação (2.29), pode-se determinar a entrada de potência de um barra k , como é mostrado no conjunto de equações abaixo [11, 1].

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{E}_k \left(\sum_{m=1}^n \mathbf{Y}_{km}^{\text{BUS}} \mathbf{E}_m \right)^*$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{P}_k + j\mathbf{Q}_k$$

$$\mathbf{S}_k = E_k e^{j\theta_k} \left(\sum_{m=1}^n (g_{km} + jb_{km}) (E_m e^{j\theta_m}) \right)^*$$

$$E_k e^{j\theta_k} E_m e^{j\theta_m} = E_k E_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} = E_k E_m (\cos(\theta_{km}) + j \sin(\theta_{km}))$$

$$\mathbf{S}_k = E_k \left(\sum_{m=1}^n E_m (g_{km} + jb_{km}) (\cos(\theta_{km}) + j \sin(\theta_{km})) \right)$$

$$\mathbf{P}_k + j\mathbf{Q}_k = E_k \left(\sum_{m=1}^n E_m (g_{km} \cos(\theta_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km})) + j E_m (g_{km} \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cos(\theta_{km})) \right) \quad (2.31)$$

Com isso, as seguintes expressões para as potências ativa (P_k) e reativa (Q_k) são obtidas:

$$P_k = E_k \sum_{m=1}^n E_m (g_{km} \cos(\theta_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km})) \quad (2.32)$$

$$Q_k = E_k \sum_{m=1}^n E_m (g_{km} \sin(\theta_{km}) + b_{km} \cos(\theta_{km})) \quad (2.33)$$

Como os termos E_k , E_m , g_{km} e b_{km} são constantes, a seguinte consideração é feita:

$$C_{km} = E_k E_m g_{km} \quad (2.34)$$

$$D_{km} = E_k E_m b_{km} \quad (2.35)$$

Aplicando as Equações (2.34) e (2.35) na (2.32) e (2.33), tem-se as seguintes expressões para as potências ativa e reativa, mostrados nas Equações (2.36) e (2.37) [1].

$$\mathbf{P}_k = E_k^2 g_{kk} + \sum_{m=1, m \neq k}^n (D_{km} \cos(\theta_{km}) + C_{km} \sin(\theta_{km})) \quad (2.36)$$

$$\mathbf{Q}_k = -E_k^2 b_{kk} + \sum_{m=1, m \neq k}^n (C_{km} \sin(\theta_{km}) - D_{km} \cos(\theta_{km})) \quad (2.37)$$

A partir dessas equações é possível modelar o comportamento da rede de transmissão, isso é feito através do fluxo de potência que ocorre entre os barramentos do sistema [2, 11, 1].

2.3 Cargas

As cargas são os componentes do sistema elétrico de potência que recebem a energia da rede de transmissão com objetivo de realizar trabalho. O funcionamento estável de um sistema de potência depende da capacidade de combinar, de maneira contínua, a saída elétrica das unidades geradoras com as cargas elétricas do sistema. Isso mostra que as características das cargas possuem importante influência na estabilidade do sistema.[2]

A existência de variados tipos de cargas com comportamentos dinâmicos distintos dificulta o processo de sua modelagem para um sistema. Entretanto, sabe-se que no comportamento real da carga existe uma relação direta com a tensão e a frequência do barramento. Em modelos simples são utilizadas algumas representações simplificadas nas quais as cargas são modeladas através de polinômios, tendo como variáveis a tensão e frequência na barra da carga em questão. No caso de modelos mais complexos a estrutura da rede é preservada, sendo necessário trabalhar com conjuntos de equações diferenciais junto com equações algébricas de fluxo de carga.[4]

A modelagem de uma determinada carga ligada a um barramento k é realizada a partir de equações relacionadas as potências ativa P_k e reativa Q_k da carga em questão. Para essa análise a estrutura da rede é preservada, sendo que o método de modelagem de carga a ser estudado é o de cargas dependentes da tensão.

O modelo de carga dependente da tensão utiliza o equacionamento das potências consumidas a partir de polinômios, como é mostrado na Equação (2.38).

$$\begin{aligned} P_k(V_k) &= \sum_j a_j V_k^j \\ Q_k(V_k) &= \sum_j b_j V_k^j \end{aligned} \quad (2.38)$$

As constantes a_j e b_j são dependentes das características da carga. Em geral, utilizar um polinômio com j variando de 0 a 2 é o suficiente. A parcela da carga quando $j = 0$ corresponde a um termo de potência constante onde não existe dependência com a tensão, como mostrado na Equação (2.39). [4]

$$\begin{aligned} P_k(V_k) &= a_0 \\ Q_k(V_k) &= b_0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

O termo da potência correspondente ao índice $j = 1$ é uma parcela da carga que se comporta de maneira linear, como uma corrente constante, proporcional à tensão, a Equação (2.40) mostra isso.

$$\begin{aligned} P_k(V_k) &= a_1 V_k \\ Q_k(V_k) &= b_1 V_k \end{aligned} \quad (2.40)$$

O último termo da potência correspondente a $j = 2$, que é uma parcela da carga que se comporta como uma impedância constante, sendo proporcional a um termo de segunda ordem da tensão, como mostrado na Equação (2.41). [4]

$$\begin{aligned} P_k(V_k) &= a_2 V_k^2 \\ Q_k(V_k) &= b_2 V_k^2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Nos modelos de carga mais exatos é feita uma combinação das três parcelas de carga citadas, expressando um polinômio de segundo grau em função da tensão. As equações que modelam as potências ativa e reativa consumida pela carga k são expressas abaixo.

$$\begin{aligned} P_k(V_k) &= a_0 + a_1 V_k + a_2 V_k^2 \\ Q_k(V_k) &= b_0 + b_1 V_k + b_2 V_k^2 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Com isso, verifica-se que para esse tipo de modelo é necessário obter as características da carga para determinar as constantes do polinômio, e dessa maneira poder simular adequadamente do comportamento da carga. [13]

Capítulo 3

Estabilidade Transitória

O comportamento ideal de um sistema elétrico de potência é o de operação em regime permanente, onde suas grandezas não variam em função do tempo, o que resulta em fluxo de potência constante na linha de transmissão. Nessa situação, todas as máquinas síncronas possuem a mesma velocidade angular, a potência elétrica gerada nas máquinas é exatamente igual a soma das potências consumidas pelas cargas mais as dissipações na rede. Isso caracteriza o ponto de operação estável do sistema, e caso nenhuma perturbação afete significativamente esse equilíbrio, o sistema permanecerá indefinidamente nesse ponto [8].

Entretanto, dificilmente o sistema de potência irá operar totalmente em regime permanente, pois existem muitas perturbações que afetam sistema, como os curtos circuitos e os harmônicos. O fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão esta diretamente relacionada às diferenças entre os ângulos de fase dos geradores síncronos, caso alguma perturbação altere essa diferenças entre os ângulos de fase , o fluxo de potência ativa da rede irá variar, podendo deslocar o ponto de operação do sistema do equilíbrio, tornando-o instável [4].

O principal objetivo de analisar a estabilidade dos sistemas de potência é verificar o seu comportamento em relação a um determinado tipo de perturbação. Essa análise verifica se o sistema encontrará um novo ponto de equilíbrio, e em quanto tempo, ou se manterá a instabilidade, afastando-se indefinidamente do ponto de operação inicial. Neste trabalho, será estudado a estabilidade transitória, que são causados por grandes distúrbios no sistema elétrico [4].

3.1 Conceitos Básicos

Para uma melhor análise sobre a estabilidade de um sistema de potência, é necessário ter uma idéia inicial sobre equilíbrio e estabilidade. Isso é feito através de alguns conceitos simples sobre esse assunto [4].

3.1.1 Ponto de Equilíbrio

Os conceitos físicos dos pontos de equilíbrio são indicados pelo fato da aceleração e da velocidade do sistema serem nulas. Genericamente, em um caso de equação de primeira ordem o estado de equilíbrio do sistema caracteriza-se por $\dot{x} = 0$, ou seja:

$$\dot{x} = f(x) = 0 \quad (3.1)$$

Em geral, os pontos de equilíbrio de um sistema n equações diferenciais de primeira ordem é o equivalente a determinar os zeros de um sistema de n equações e n incógnitas [14].

Para facilitar a análise de estabilidade em alguns casos, o ponto de equilíbrio do sistema é transladado para a origem. Isso é feito através do uso de substituição de variáveis, onde as equações são escritas em termos de outras variáveis. Sendo x^* um ponto de equilíbrio do sistema, logo temos:

$$\begin{aligned} f(x^*) &= 0 \\ y &= x - x^* \\ \dot{y} + \dot{x}^* &= f(y + x^*) \\ \dot{y} &= f(y + x^*) = g(y) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\dot{y} = g(y) \rightarrow y = 0$$

A Equação (3.2) mostrou que $y = 0$ é um ponto de equilíbrio da equação acima. Com isso, em vez de estudar a estabilidade de um ponto de equilíbrio genérico, é possível estudá-lo na origem do sistema [4].

3.1.2 Definição de Estabilidade

Considerando um sistema de primeira ordem $\dot{x} = f(x)$ e um ponto de equilíbrio x^* , tem-se a seguinte definição matemática para estabilidade de um sistema:

DEF: Um ponto de equilíbrio x^* é dito estável se para dado $\epsilon > 0$, exista um $\delta > 0$ dependendo de ϵ tal que todo o ponto inicial x_0 satisfazendo $|x_0 - x^*| < \delta$, a solução $\phi(t)$ com $\phi(t_0) = x_0$ satisfaz $|\phi(t) - x^*| < \epsilon$ para $t > t_0$.

Essa definição diz que um ponto de equilíbrio é estável se, e somente se, toda a solução que inicia-se em sua vizinhança não se distancia de maneira significativa com o passar do tempo. Em outra definição de estabilidade, é dito que toda a solução iniciada em uma vizinhança do ponto de equilíbrio deve convergir para o ponto de equilíbrio com o passar do tempo. A Figura (3.1) mostra um esquema do comportamento estável de um ponto de equilíbrio [4].

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = x^* \quad (3.3)$$

Caso o ponto de equilíbrio do sistema não se comporte de acordo com a definição, o sistema é dito

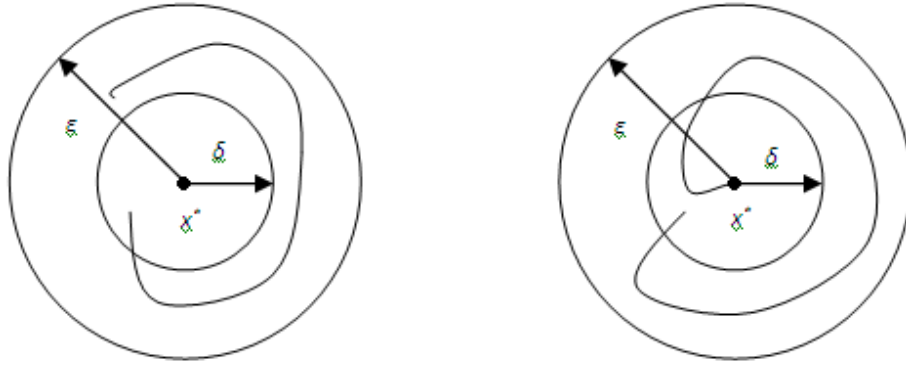


Figura 3.1: Ponto de equilíbrio estável do sistema e sua vizinhança.

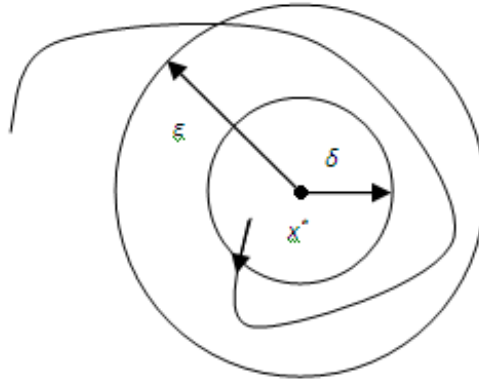


Figura 3.2: Ponto de equilíbrio instável.

instável. Ou seja, as soluções iniciando-se nas vizinhanças do ponto de equilíbrio divergem com o passar do tempo. A Figura (3.2) mostra o comportamento de um sistema onde o seu ponto de equilíbrio esta instável [4].

3.1.3 Determinação da Estabilidade

Toda a análise de estabilidade visa determinar, no caso de alguma falta, se o sistema é transitoriamente estável. Considerando que antes da falta, o sistema opera em regime permanente, com isso verifica-se que $\ddot{\delta} = 0$ e $\dot{\delta} = 0$, e os ângulos δ permanecem constantes, podendo ser determinados através de um fluxo de carga [8, 14].

Em um tempo $t = 0$ ocorre a falta no sistema, ocasionando em alterações na topologia da rede e consequentemente na matriz de admitância do sistema. A potência elétrica P_{e_i} fornecida a rede pela máquina i esta diretamente relacionada aos parâmetros da rede, com isso, um novo conjunto de equações diferenciais descreve o comportamento do sistema durante o intervalo de tempo da falta, que é de $t = 0$ até o tempo de eliminação do defeito (tempo de abertura) t_a .

Após a eliminação do defeito, o sistema volta a funcionar, entretanto a alteração na topologia da rede ocasionada pela falta faz com que a operação do sistema pós falta seja distinto do pré-falta. Portanto outro

conjunto de equações diferenciais é utilizado para descrever o comportamento do sistema pós-falta, a partir do tempo de abertura t_a até o infinito [14, 12].

Levando em conta os intervalos de tempo pré-falta, em falta e pós-falta, onde cada um possui uma topologia de rede distinta das demais, pode-se dizer que a equação diferencial do sistema possui descontinuidades estruturais no tempo, como é mostrado na Equação (3.4) [4].

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e = 0 \quad \begin{cases} t \leq 0, P_e = P_e^{prf} \\ 0 < t \leq t_a, P_e = P_e^f \\ t \geq t_a, P_e = P_e^{pf} \end{cases} \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) pode ser descrita como três conjuntos de equações diferenciais, como mostrado logo abaixo [4]:

Sistema pré-falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^{prf} = 0 \quad \begin{aligned} &t \leq 0 \\ &\delta(t) = \delta^0, \dot{\delta}(0) = 0 \\ &i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sistema em falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^f = 0 \quad \begin{aligned} &0 < t \leq t_a \\ &\delta(0) = \delta^0, \dot{\delta}(0) = 0 \\ &i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sistema pós falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^{pf} = 0 \quad \begin{aligned} &t \geq t_a \\ &\delta^{pf}(t_a) = \delta^f(t_a) \\ &i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.7)$$

Como no pré-falta o sistema se encontra em equilíbrio em regime permanente, sua solução pode ser obtida com o calculo do fluxo de potência, que se trata do cálculo de ponto de equilíbrio do conjunto de equações diferenciais. Dada a falta, é necessário determinar qual o valor máximo do tempo de abertura, de maneira que o sistema ainda permaneça estável. Esse é o tempo crítico de abertura, que é utilizado para a programação do tempo de abertura dos relés. No pós-falta, é necessário saber a solução do sistema em falta para o tempo crítico de abertura t_{ca} para determinar as condições iniciais [4].

3.1.4 Critério das Áreas Iguais

O Critério das Áreas Iguais é um método de resolução de estabilidade transitória. Esse método é fundamentado a partir do conceito de energia do sistema, e se destaca por sua rapidez computacional. A energia de um sistema físico é uma função dependente apenas de sua posição e velocidade. Com base na 2ª lei de Newton, pode-se determinar o princípio de conservação de energia a partir do conjunto de Equações (3.8).

$$\begin{aligned}
m \frac{dv}{dt} &= F(x) \\
mv \frac{dv}{dt} &= vF(x) \iff mv \frac{dv}{dt} = F(x) \frac{dx}{dt} \\
mv dv &= F(x) dx \\
m \int_{v_2}^{v_1} v^* dv^* &= \int_{x_2}^{x_1} F(x) dx^* \\
\int_{x_2}^{x_1} F(x) dx^* &= \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2) \iff \Delta E_c = -\Delta E_p
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Definindo uma referência, é possível definir a função energia de maneira absoluta. Sendo as posições x_o e a velocidade v_o os estados de referência, tem-se a energia total expressa através da Equação (3.9) [4].

$$\begin{aligned}
E_T &= E_c + E_p \\
E_p &= - \int_{x_o}^{x_o} F(x^*) dx^* \\
E_c &= \frac{mv_o^2}{2}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Considerando que o sistema é conservativo, tem-se que a integral não depende do caminho. Com isso, a primeira integral desse sistema é composta por pela energia potencial E_p . A Equação (3.10) descreve todos os sistemas conservativos, mostrando que a força atua no sentido inverso do gradiente da energia potencial [4].

$$m\ddot{x} = - \frac{dE_p(x)}{dx} \tag{3.10}$$

Um sistema de potência de uma máquina versus um barramento infinito, considerando as perdas por amortecimento desprezadas, é um sistema conservativo. Com isso, pode-se aplicar o procedimento da Equação (3.10) para definir-se uma função de energia para o sistema de potência, como mostrado na Equação (3.11).

$$\begin{aligned}
M \frac{d\omega}{dt} &= P_m - \frac{E_G E_\infty}{X} = P_m - P_{max} \sin(\delta) \\
M\omega \frac{d\omega}{dt} &= (P_m - P_{max} \sin(\delta))\omega \iff M\omega \frac{d\omega}{dt} = (P_m - P_{max} \sin(\delta)) \frac{d\delta}{dt} \\
M\omega d\omega &= (P_m - P_{max} \sin(\delta)) d\delta
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Integrando a Equação (3.11) e tomando velocidade $\omega_o = 0$ e o ângulo de equilíbrio estável δ^S como referências do sistema, as Equações (3.12) são obtidas [4].

$$\begin{aligned}
E_c &= \frac{M\omega_o^2}{2} \\
E_p &= -P_m(\delta - \delta^S) - P_{max}(\cos(\delta) - \cos(\delta^S))
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Verifica-se que o cálculo da integral correspondente a energia potencial é equivalente ao cálculo das áreas na curva de potência. Com auxílio da curva de potência, mostrada na Figura (3.3), determina-se que o ângulo máximo que poderia ser atingido após a eliminação da falta, de maneira que o sistema ainda permaneça estável, seria o ângulo correspondente ao ponto de equilíbrio instável δ^u [4, 9].

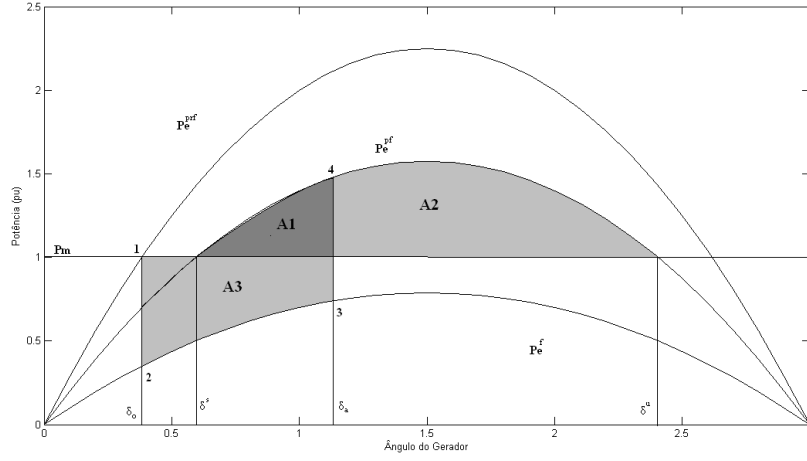


Figura 3.3: Curva de potência

Admitindo-se que a falta tenha sido eliminada num certo ângulo $\delta_a = \delta_{cr}$, tal que o sistema atinja a velocidade síncrona $\omega = 0$ exatamente no ângulo δ^u . Com isso a energia potencial do sistema em δ^u será:

$$-\int_{\delta^s}^{\delta^u} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = A_1 - A_2 \quad (3.13)$$

A energia potencial no instante da abertura é expressa na Equação (3.14):

$$\int_{\delta^s}^{\delta_a} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = A_1 \quad (3.14)$$

Mesmo após a falta, o sistema se mantém conservativo. Logo a expressão para a variação da energia cinética, que é mostrada na Equação (3.27), é a mesma para o negativo da variação da energia potencial [4].

$$\Delta E_c = -\Delta E_p = \int_{\delta_o}^{\delta_a} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta \quad (3.15)$$

Como a energia cinética inicial é nula, tem-se a seguinte expressão para a energia cinética no instante de abertura, mostrada na Equação (3.16).

$$E_c = \Delta E_c = \int_{\delta_o}^{\delta_a} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta = A_3 \quad (3.16)$$

A falta é eliminada criticamente quando a energia total no instante de abertura é igual à energia potencial do ponto de equilíbrio δ^u . A Equação (3.17) mostra a relação entre as áreas [4].

$$\begin{aligned} E_c|_{\delta_a} + E_p(\delta_a) &= E_p(\delta^u) \\ A_3 + A_1 &= A_1 + A_2 \iff A_3 = A_2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Se o defeito for eliminado em um ângulo δ_a de maneira que $A_3 < A_2$, então o sistema é estável no pós-falta. Caso $A_3 > A_2$ o sistema após a falta será instável. A partir da expressão de igualdade de áreas da Equação (3.17) é possível determinar uma formulação para o ângulo crítico de abertura δ_{cr} , como mostrado no conjunto de Equações (3.18) [4].

$$\begin{aligned} \int_{\delta_o}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{max}^f \text{sen}(\delta)) d\delta &= - \int_{\delta_{cr}}^{\delta^u} (P_m - P_{max}^{pf} \text{sen}(\delta)) d\delta \\ P_m(\delta_{cr} - \delta_o) + P_{max}^f (\cos(\delta_{cr} - \delta_o)) &= P_m(\delta_{cr} - \delta^u) + P_{max}^f (\cos(\delta_{cr} - \delta^u)) \\ (P_{max}^f - P_{max}^{pf}) \cos(\delta_{cr}) &= P_m(\delta_o + \delta^u) + P_{max}^f \cos(\delta_o) - P_{max}^{pf} \cos(\delta^u) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Explicitando o ângulo crítico de abertura da última expressão do conjunto de Equações (3.18), a seguinte fórmula é obtida:

$$\begin{aligned} \cos(\delta_{cr}) &= \frac{P_m(\delta_o + \delta^u) + P_{max}^f \cos(\delta_o) - P_{max}^{pf} \cos(\delta^u)}{(P_{max}^f - P_{max}^{pf})} \\ \delta_{cr} &= \cos^{-1} \left(\frac{P_m(\delta_o + \delta^u) + P_{max}^f \cos(\delta_o) - P_{max}^{pf} \cos(\delta^u)}{(P_{max}^f - P_{max}^{pf})} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

A partir do Critério das Áreas Iguais obteve-se o ângulo crítico de abertura δ_{cr} sem o conhecimento da solução das equações diferenciais. Os métodos que se caracterizam dessa maneira são denominados de métodos diretos de análise de estabilidade. Utilizando do δ_{cr} é possível obter o tempo crítico de abertura t_{cr} através de uma simulação numérica do sistema em falta. Com isso, os resultados da análise de estabilidade transitória são obtidos [4, 9].

3.2 Sincronismo e Estabilidade

A análise de estabilidade transitória em sistemas de potência é tratada como o estudo do sincronismo entre as máquinas. Logo, os sistemas de potência considerados estáveis devem possuir todas as máquinas acelerando simultaneamente após a eliminação da falta. As Figuras (3.4) e (3.5) mostram um exemplo de comportamento estável, através dos ângulos das máquinas e dos desvios das velocidades angulares do sistema após a falta [4, 11].

No caso de algumas das máquinas acelerarem mais do que as outras, no pós-falta, o sistema de potência terá um comportamento instável, perdendo-se a operação do sistema. As Figuras (3.6) e (3.7) mostram um exemplo de comportamento instável, através dos ângulos das máquinas e das desvio das velocidades angular, do sistema após a falta. Nesses exemplos, nenhuma das máquinas do sistema é utilizada como referência do sistema.

A dependência da estabilidade com o sincronismo das máquinas ocorre por não ser possível estudar matematicamente a estabilidade de um ponto de equilíbrio do sistema de potência, isso se deve a não existência de um ponto de equilíbrio para esse sistema. Para contornar essa dificuldade, uma nova formulação coloca o problema matematicamente em termos do sincronismo entre as máquinas.

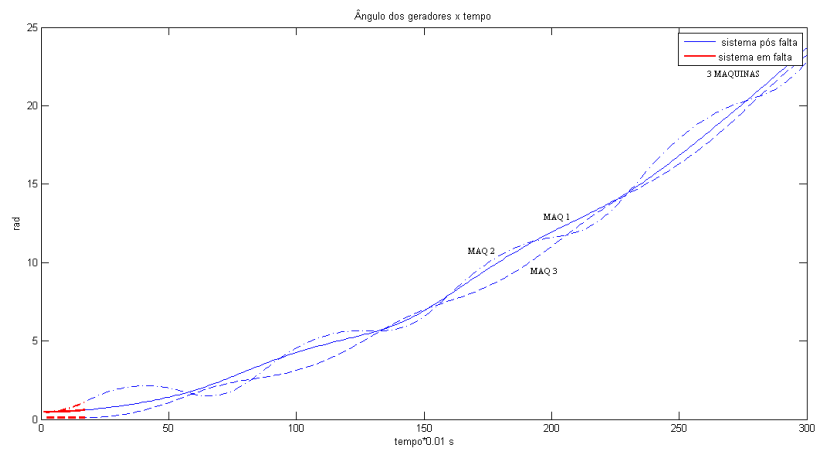


Figura 3.4: Ângulos das máquinas em relação ao tempo, comportamento estável [4].

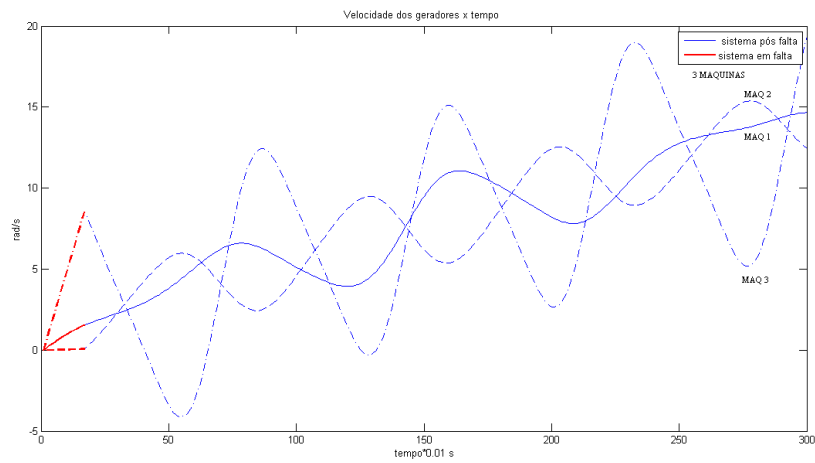


Figura 3.5: Desvios das velocidades em relação ao tempo, comportamento estável [4].

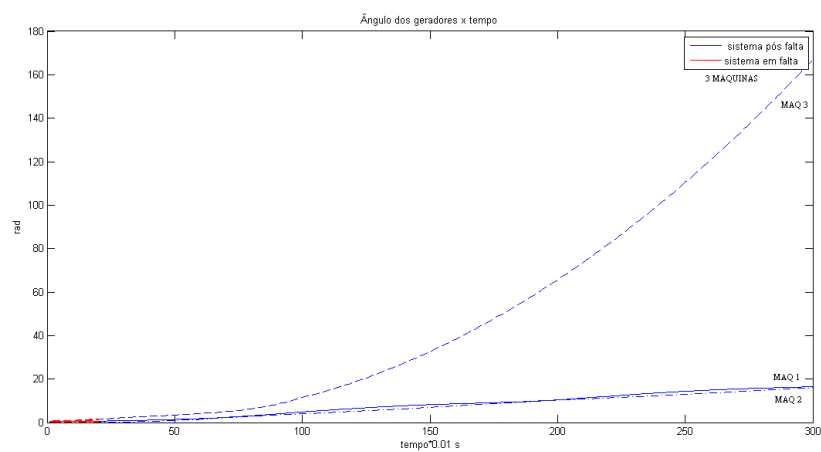


Figura 3.6: Ângulos das máquinas em relação ao tempo, comportamento instável [4].

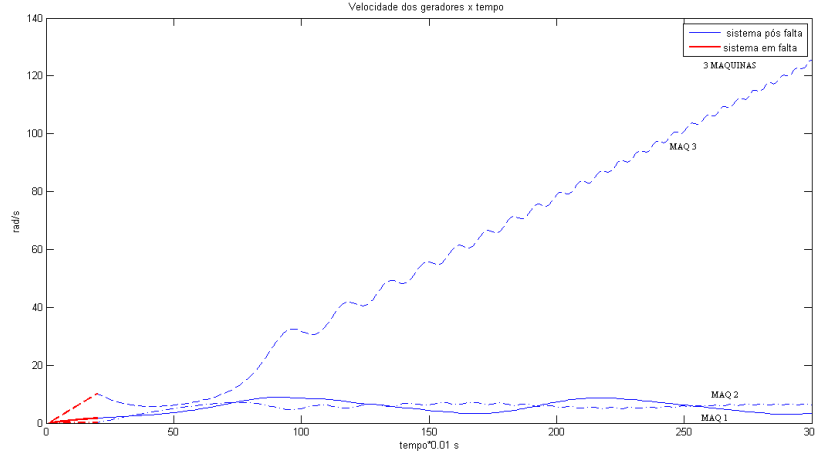


Figura 3.7: Desvios das velocidades em relação ao tempo, comportamento instável [4].

A utilização da nova formulação transforma o problema original de análise do sincronismo entre as máquinas num problema de estabilidade de um novo conjunto de equações diferenciais, que é, por sua vez, equivalente ao estudo do sincronismo no sistema original. Para esse estudo serão enfocadas as formulações "Máquina como Referência" e "Centro de Ângulo como Referência" [4].

3.2.1 Máquina como Referência

O tipo de formulação "Máquina como Referência" (OMR) é conhecida como representação do sistema em espaço de estados, onde uma determinada máquina vai ser um referencial para as demais. Considerando um sistema de n máquinas, é possível descrever o conjunto de equações diferenciais da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_1 &= \frac{P_{m1} - P_{e1}}{M_1} \\
 \dot{\omega}_2 &= \frac{P_{m2} - P_{e2}}{M_2} \\
 &\vdots \\
 \dot{\omega}_n &= \frac{P_{mn} - P_{en}}{M_n} \\
 \dot{\delta}_1 &= \omega_1 \\
 \dot{\delta}_2 &= \omega_2 \\
 &\vdots \\
 \dot{\delta}_n &= \omega_n
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Utilizando a máquina n como referência, um novo conjunto de equações diferenciais é obtido a partir da subtração de todas as equações pela equação da máquina referencial. Esse conjunto de equações diferenciais que representam o sistema é composto por $2(n-1)$ equações resultantes da subtração, mais a equação

da máquina utilizada como referência. A Equação (3.21) mostra o conjunto de equações diferenciais com a máquina n como referência [4].

$$\begin{aligned}
\dot{\omega}_{1n} &= \dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_n = \frac{P_{m1}-P_{e1}}{M_1} - \frac{P_{mn}-P_{en}}{M_n} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\dot{\omega}_{(n-1)n} &= \dot{\omega}_{(n-1)} - \dot{\omega}_n = \frac{P_{m(n-1)}-P_{e(n-1)}}{M_{(n-1)}} - \frac{P_{mn}-P_{en}}{M_n} \\
\dot{\delta}_{1n} &= \dot{\delta}_1 - \dot{\delta}_n = \omega_1 - \omega_n \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\dot{\delta}_{(n-1)n} &= \dot{\delta}_{(n-1)} - \dot{\delta}_n = \omega_{(n-1)} - \omega_n \\
\dot{\omega}_n &= \frac{P_{mn}-P_{en}}{M_n} \\
\dot{\delta}_n &= \omega_n
\end{aligned} \tag{3.21}$$

No estudo do sincronismo do sistema, observa-se que as $2(n - 1)$ equações diferenciais resultantes da subtração compõem um subsistema que é desacoplado das equações da máquina de referência. Esse subsistema é conhecido como a formulação do problema de estabilidade utilizando uma máquina como referência, onde o estudo da estabilidade desse subsistema é equivalente ao sincronismo das máquinas no sistema original. No equilíbrio do sistema todas as máquinas possuirão a mesma velocidade e a mesma aceleração, como mostrado na Equação (3.22) [4].

$$\begin{aligned}
\omega_1 &= \omega_2 = \dots = \omega_n \\
\frac{P_{m1}-P_{e1}}{M_1} &= \frac{P_{m2}-P_{e2}}{M_2} = \dots = \frac{P_{mn}-P_{en}}{M_n}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

3.2.2 Centro de Ângulo como Referência

Outro modo de representação do sistema pode ser feito a partir da formulação com "Centro de Ângulo como Referência". Esse tipo de formulação é equivalente ao "Máquina como Referência". O "Centro de Ângulo como Referência"(COA) possui um ideal semelhante ao de Centro de Massa na mecânica clássica, e pode ser definido como sendo o ângulo formado pela média dos ângulos de todos os geradores síncronos, ponderada pela constante de inércia das máquinas. A Equação (3.23) mostra essa formulação:

$$\delta_o = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \tag{3.23}$$

A velocidade da formulação de "Centro de Ângulo como Referência" é calculada a partir da derivada temporal da Equação (3.23), como mostrada na (3.24) [4].

$$\dot{\delta}_o = \omega_o = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \quad (3.24)$$

onde: $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$

Derivando a Equação (3.24) obtêm-se a dinâmica do sistema para COA, como mostrado abaixo na (3.25):

$$M_T \dot{\omega}_o = \omega_o = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) = P_{COA} \quad (3.25)$$

A potência P_{COA} é exatamente o desbalanço de potência existente em todo o sistema, sendo o somatório de toda a potência mecânica injetada menos a soma de toda a potência elétrica consumida pela rede. Aplicando a equação da potência elétrica (P_{ei}) na Equação (3.25), a seguinte expressão para P_{COA} é obtida, como mostrada na Equação (3.26) [4].

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.26)$$

Após a definição do COA, ele é utilizado como referência para o sistema, de maneira que todas as variáveis do sistema são medidas em relação a esse referencial. Com isso, a nova formulação tomará o ângulo dos geradores com relação ao COA como o novo ângulo. A Equação (3.27) mostra a formulação do ângulo e da velocidade relativa do sistema [4].

$$\begin{aligned} \theta_i &= \delta_i - \delta_o \\ \dot{\theta}_i &= \omega^* = \omega - \omega_o \end{aligned} \quad (3.27)$$

A partir das novas variáveis definidas na Equação (3.27), o comportamento do sistema pode ser descrito a partir do seguinte conjunto de equações diferenciais.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i^* &= \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} - \frac{1}{M_T} P_{COA} \\ \dot{\theta}_i &= \omega_i^* \end{aligned} \quad (3.28)$$

É possível visualizar que no conjunto de $2n$ equações juntamente com as equações diferenciais do COA é completamente descrito o sistema original. A análise dos pontos de equilíbrio do sistema de $2n$ equações equivale ao estudo do sincronismo do sistema original. Com isso, interpreta-se o sincronismo neste caso como o ângulo e a velocidade de todas as máquinas permanecem próximos do referencial COA. Logo, no equilíbrio do sistema, a seguinte expressão é obtida [4].

$$\begin{aligned} \omega_1^* &= \omega_2^* = \dots = \omega_n^* \\ \frac{P_{m1} - P_{e1}}{M_1} &= \frac{P_{m2} - P_{e2}}{M_2} = \dots = \frac{P_{mn} - P_{en}}{M_n} = \frac{P_{COA}}{M_T} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Assim como na formulação "Máquina como Referência", o equilíbrio exige que as velocidades e as acelerações das máquinas sejam iguais. Com isso, as expressões (3.22) e (3.29) são as mesmas, uma vez que:

$$\frac{P_{COA}}{M_T} = \frac{\sum_{i=1} n (P_{mi} - P_{ei})}{\sum_{i=1} n M_i} \quad (3.30)$$

Capítulo 4

Flexible Alternative Current Transmission Systems - *FACTS*

O desenvolvimento na estrutura dos sistemas elétricos de potência é realizado com o intuito de aumentar e melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica para os variados tipos de cargas. Uma maneira de realizar esse desenvolvimento na estrutura elétrica é através da interligação entre os diversificados sistemas de variadas regiões, o que aumenta a capacidade de transmissão e de manobras de energia elétrica, melhorando dessa maneira a eficiência desses sistemas. Entretanto, em um sistema interligado, um distúrbio em determinada parte do sistema pode afetar ele todo, ocasionando em quedas no fornecimento de energia. Devido a isso, um dos fatores mais importantes para o sistema elétrico de potência é a sua confiabilidade. Uma das ferramentas utilizadas para aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos são os *FACTS* [6, 5].

Os dispositivos *FACTS*, que do inglês significa "Flexible Alternative Current Transmission Systems", são equipamento que utilizam eletrônica de potência para controlar e aumentar o fluxo de potência nas linhas de transmissão. Com o controle dos fluxos é possível direcioná-los para regiões que possuem capacidade ociosa de carregamento, aliviando as regiões de estreitamento da transmissão. Desta maneira, o sistema se torna robusto e flexível, sendo mais confiável no caso de serem sujeitos a grandes distúrbios, como curtos-circuitos trifásicos na rede de transmissão [10].

Devido a funcionalidade e a eficiência dos *FACTS*, neste capítulo é realizado um estudo desses dispositivos quando aplicados no sistema elétrico. Esses estudos focam o funcionamento e alguns dos conceitos básicos de operação, como o conceito de compensação de reativos. Além disso, também são analisados os tipos de *FACTS*, sendo destacado o estudo da compensação *shunt*, mais especificamente o dispositivo SVC (Static VAR Compensator - Compensador Estático de Reativos) [5].

4.1 Controle de Compensação de Reativos por Dispositivos *FACTS*

O fluxo de potência de uma rede de transmissão está diretamente relacionado na combinação de fatores como estabilidade (transitória e dinâmica), limites de tensão e limites de temperatura das linhas e

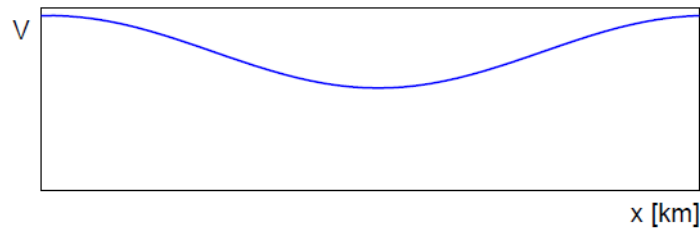


Figura 4.1: Perfil de tensão da rede em regime permanente [1].

equipamentos do sistema. Com isso, o fluxo de potência na rede de transmissão influencia diretamente na operação de um sistema de potência, sendo de grande importância para um melhor funcionamento desse sistema. A partir disso, verificou-se uma necessidade de realizar um controle nesse fluxo de potência com intuito de otimizar o funcionamento do sistema de potência [5].

Uma das maneiras mais utilizadas para controlar o fluxo de potência em um sistema elétrico é através da absorção de potência reativa na rede de transmissão. Através desse controle de reativos é possível aumentar a capacidade transferência de potência na rede, além de amortecer as pequenas oscilações causadas pelas entradas e saídas de cargas no sistema. Com isso, o rendimento e a confiabilidade do sistema de potência aumentam [5].

Os compensadores de potência reativa, em geral, utilizam capacitores ou reatores para a absorção de potência, sendo que, os capacitores são os elementos mais utilizados para este fim. A escolha entre capacitor o reator para a compensação vai depender do tipo de controlador que será implementado no sistema. Como existem variados tipos de perturbações no sistema elétrico, diferentes tipos de compensadores são utilizados para atender os requisitos necessários para manter a estabilidade do sistema [1, 15].

Os principais tipos de compensadores utilizados nos sistemas de potência são: o compensador *shunt* e o compensador série e o compensador de ângulo de fase. Os princípios básicos desses compensadores serão abordados a seguir. Para uma melhor análise do funcionamento ideal de cada um desses compensadores, considera-se que a implementação do dispositivo é feita em um sistema de corrente alternada simples composto de duas máquinas síncronas ideais interligadas através de uma linha de transmissão curta [5].

4.1.1 Compensador *Shunt*

Os compensadores conectados em *shunt* podem ser ligados de forma permanente a rede, fornecendo energia reativa de acordo com as necessidades operacionais do sistema. Dessa maneira as oscilações eletromecânicas que ocorrem durante a operação são minimizadas, melhorando dessa forma a estabilidade e a regulação de tensão do sistema. Com isso, a corrente elétrica que circula na linha de transmissão também é reduzida, diminuindo dessa forma as perdas por efeito Joule, o que aumenta a eficiência do sistema e diminuindo o risco de falhas térmicas na linha ou em algum componente da rede [1, 10].

Quando a compensação *shunt* é introduzida no sistema, geralmente é instalado perto dos centros consumidores com o intuito de melhorar perfil de tensão nessa região. Em linhas longas, esse tipo de compensação é utilizada para regulação de tensão, sendo normalmente instalado no meio da linha devido ao formato do perfil de tensão da rede em regime permanente, como mostrado na Figura (4.1), entretanto isso

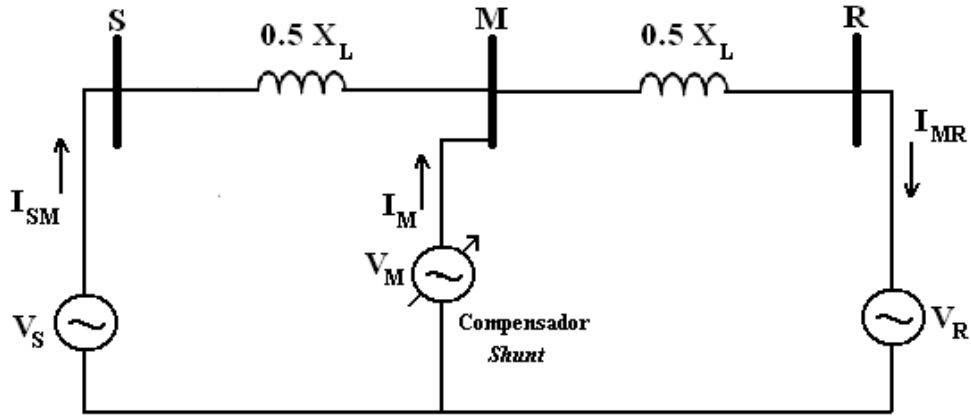


Figura 4.2: Sistema com compensação *shunt* [5].

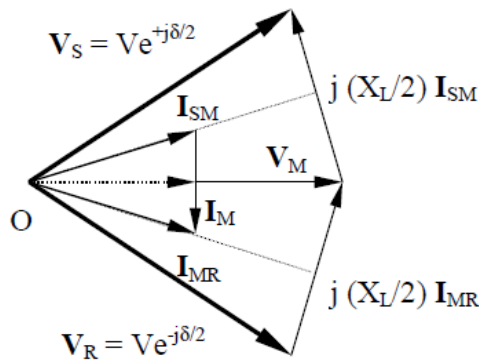


Figura 4.3: Diagrama fasorial do sistema com compensação *shunt* ideal [5].

também vai depender do comprimento da linha.

Para a análise do comportamento ideal de um compensador *shunt* considera-se o sistema mostrado na Figura (4.2), onde a fonte de tensão V_S é continuamente controlada com objetivo de controlar o fluxo de potência através dessa linha de transmissão. Nessa análise as tensões V_S e V_R possuem a mesma amplitude, porém são defasados de um ângulo δ [5].

O diagrama fasorial do sistema elétrico analisado, quando a tensão de compensação V_M tem a mesma amplitude que as tensões terminais (V_S e V_R), pode ser visualizado na Figura (4.3). Neste caso, a potência transferida do terminal V_S para o lado da carga V_R é expressa pela Equação (4.1), onde V é a amplitude das tensões terminais V_S e V_R [5].

$$P_S = \frac{2V^2}{X_L} \text{sen} \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (4.1)$$

No caso do sistema analisado estiver sem a compensação *shunt*, a potência transferida entre os terminais R e S é expressa pela Equação (4.2).

$$P_S = \frac{V^2}{X_L} \text{sen} (\delta) \quad (4.2)$$

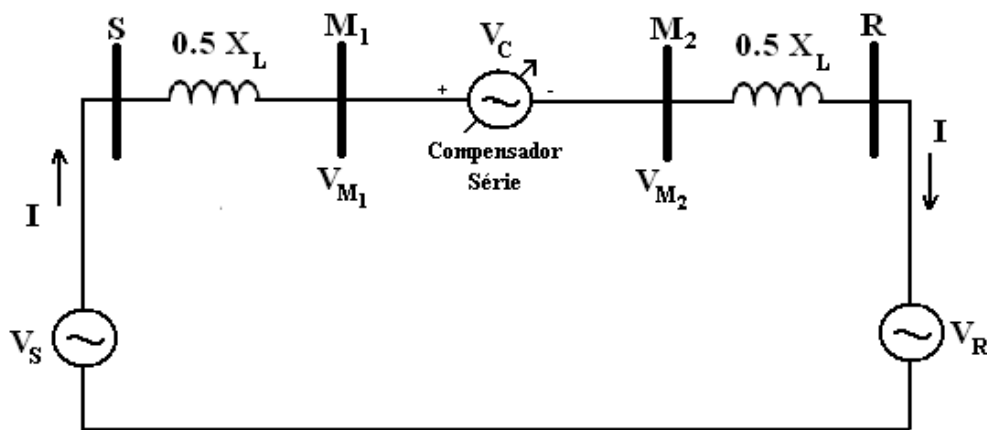


Figura 4.4: Sistema com compensação série [5].

A partir da comparação entre as Equações (4.1) e (4.2), verifica-se que o compensador *shunt* de reativos aumenta a capacidade de transmissão de potência ativa pela rede de corrente alternada, sendo seu valor máximo com a defasagem $\delta = 30^\circ$. Através do diagrama fasorial mostrado na Figura (4.3) verifica-se que a corrente de compensação I_M está em quadratura com a tensão de compensação V_M , não existindo potência ativa fluindo através do compensador. Dessa forma, apenas potência reativa flui pela fonte V_M , caracterizando o seu funcionamento ideal [5].

A aplicação de um compensador *shunt* de reativos necessita de um projeto cuidadoso e bem analisado, pois trata-se de um equipamento de alto custo. Por esse motivo, geralmente o compensador é ligado via disjuntores, adquirindo dessa maneira possibilidades de manobras e maior flexibilidade. Os disjuntores conectados ao compensador *shunt* devem suportar altas cargas, no caso de desconexão do compensador do sistema, os disjuntores devem suportar uma tensão de 2 p.u devido ao período de descarga dos capacitores. Além disso, os capacitores ligados em *shunt* criam frequências de ressonância subsíncrona, podendo levar a sobretensões harmônicas em algumas barras do sistema [10].

4.1.2 Compensador Série

Os compensadores ligados em série atuam na linha de transmissão diminuindo a impedância série da linha. Com essa redução na impedância série, a capacidade de transferência de potência da rede é aumentada, é conseqüentemente ocorre uma melhora na margem de estabilidade do sistema. A potência reativa absorvida em uma linha de transmissão é dependente da sua corrente de linha. Isso se deve ao fato da compensação série reduzir a reatância da linha, diminuindo a queda de tensão na linha, tornando-se menos suscetíveis às condições de carga [10, 1, 15].

Em geral, o compensador série é empregado para melhorar o fluxo de potência entre dois locais, sendo instalados no meio das linhas de alta tensão em sistemas interligados. Para analisar o comportamento ideal do compensador série, considera-se o sistema mostrado na Figura (4.4). Onde o compensador série é representado por uma fonte de tensão V_C , sendo conectado ao ponto médio da linha de transmissão [10, 5].

A corrente que circula o sistema analisado pode ser calculada pela Equação (4.3). No caso da tensão

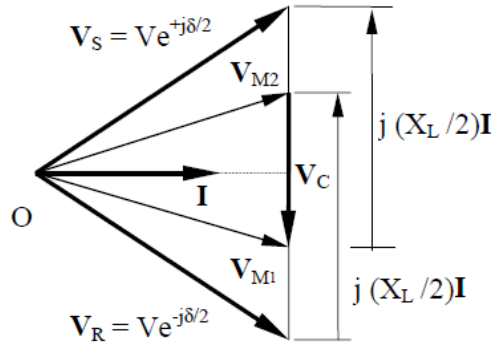


Figura 4.5: Diagrama fasorial do sistema com compensação série ideal [5].

controlada do compensador V_C estiver em quadratura em relação a corrente de linha, o compensador série não irá fornecer ou absorver potência ativa. Dessa maneira, o fluxo de potência nos terminais da fonte V_C será apenas reativa. Com isso, a fonte de tensão V_C pode ser representada, a partir de seus terminais, como uma reatância equivalente capacitiva ou reativa. A partir daí, o fluxo de potência ativa pela linha de transmissão é expressa pela Equação (4.4) [5, 15].

$$I = \frac{V_{SR} - V_C}{jX_L} \quad (4.3)$$

$$V_{SR} = V_S - V_R$$

$$I_s = \frac{V^2}{X_L(1 - s)} \quad (4.4)$$

A partir da Equação (4.4) é possível perceber que a potência ativa transmitida pela rede pode ser aumentada de maneira considerável para s nos limites $0 < s < 1$, sendo que s é a taxa de compensação série de reativos que varia no intervalo de -1 e 1 ($-1 < s < 1$). O diagrama fasorial do sistema analisado com a compensação série ideal pode ser visualizado na Figura (4.5), onde neste caso, o fasor da corrente de linha está adiantado em 90° em relação ao fasor da fonte de tensão V_C .

O funcionamento do compensador série é definido através seu grau de compensação. Como por exemplo, uma compensação de 1 p.u significa que a reatância série efetiva de uma linha de transmissão será zero. Entretanto, por limite operacional, a compensação série máxima é de 0.75 p.u, o que já é o suficiente para aumentar significativamente a estabilidade do sistema [10].

Apesar de uma série benefícios, a compensação série pode gerar impactos negativos ao sistema, como gerar ressonância subsíncrona na linha de transmissão. Essa ressonância subsíncrona gerada pelo compensador série pode levar distúrbios aos geradores síncronos ligados a rede de transmissão, podendo alterar o sincronismo do gerador e causar perdas de rendimento mecânico da máquina [10].

Assim como na compensação *shunt*, a implementação do compensador série deve ser feita de maneira cuidadosa, tendo que levar em conta vários fatores. A ligação de banco capacitores em série em uma linha de transmissão longa é feita através da colocação de uma impedância aglomerada em um ponto. Para isso ser feito de adequada, os seguintes fatores devem ser levados em conta:

- A amplitude da tensão através dos bancos de capacitores (isolamento).
- As correntes de faltas nos terminais dos bancos de capacitores.
- O número de bancos de capacitores e suas localizações em uma linha de transmissão longa (perfil de tensão).

Cada tipo de compensação exerce, de uma maneira mais adequada, determinada função na rede de transmissão. Para aumentar a capacidade de transferência de potência ativa, o compensador de potência que atua de melhor forma é o compensador série. O compensador *shunt* também pode ser usado para melhorar o fluxo de potência, mas para esse caso a melhor escolha é o compensador série. Já para aumentar a margem de estabilidade dinâmica do sistema, a melhor dispositivo a ser empregado na rede é o compensador *shunt* [10, 5, 15].

Os equipamentos que realizam os variados tipos de compensação de potência reativa são, geralmente, os dispositivos *FACTS*. Existem diferentes tipos de *FACTS*, e a escolha do tipo de dispositivo que será implementado no sistema dependerá de fatores distintos. Desses fatores, os mais importantes na escolha dos dispositivos *FACTS* são o tipo de compensação necessária no sistema, que dependerá do fluxo de potência e da estabilidade, e o tipo de controle que será implementado.

4.1.3 Tipos de controladores *FACTS*

Os controladores *FACTS* são dispositivos que utilizam eletrônica de potência para realizar a compensação de potência reativa na rede de transmissão. Esses dispositivos realizam o controle do fluxo de potência nas linhas de transmissão durante condições de regime permanente e de regime transitório. O surgimento dos *FACTS* se deve aos avanços da indústria de semi-condutores de alta potência e da engenharia de materiais, tornando possível utilizar os conceitos de eletrônica para sistemas de alta potência [1].

Os *FACTS* tornam a rede de energia eletronicamente controlada, alterando o modo de planejamento e operação das redes de transmissão. Através desse controle eletrônico da rede, o sistema pode se adaptar a mudanças das condições de operação causadas por faltas e variações de cargas. Os dispositivos *FACTS* também podem fornecer o controle de um ou mais parâmetros do sistema de transmissão [1, 6].

A boa funcionalidade, a melhora da eficiência energética e o aumento da confiabilidade dos sistemas colocaram os dispositivos *FACTS* em destaque. Com essas melhoras no desempenho operacional e as vantagens financeiras, os controladores *FACTS* vêm recebendo grandes investimentos de fabricantes de equipamentos elétricos e de organizações de pesquisa. Para esse controle ser feito de melhor maneira para diferentes situações que podem ser impostas ao do sistema, foram desenvolvidos variados tipos de controladores *FACTS*. A classificação dos controladores *FACTS* pode ser feita da seguinte forma [6, 15]:

- Controladores conectados em *shunt*.
- Controladores conectados em série.
- Controladores combinados série-série.

- Controladores combinados *shunt*-série.

Dependendo dos tipos de dispositivos de eletrônica de potência que são usados para o controle da linha, é possível classificar os controladores *FACTS* da seguinte forma [6]:

- Impedância variável.
- Conversor fonte de tensão (*VSC*).

Para os controladores *FACTS* de impedância variável, temos os seguintes dispositivos e seus respectivos tipos de conexões [6]:

- Static Var Compensator (*SVC*) - conexão *shunt*.
- Thyristor Controlled Series Compensator (*TCSC*) - conexão série.
- Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (*TCPST*) - conexão combinada *shunt*-série.

Já para os controladores *FACTS* de conversor de fonte de tensão, temos os seguintes dispositivos e seus respectivos tipos de conexões:

- Static synchronous Compensator (*STATCOM*) - conexão *shunt*.
- Static Synchronous Series Compensator (*SSSC*) - conexão série.
- Interline Power Flow Controller (*IPFC*) - conexão combinada *shunt*-série.
- Unified Power Flow Controller (*UPFC*)- conexão combinada série-série.

Dentre os diversos tipos de controladores *FACTS* desenvolvidos, os que mais se destacam são: os compensadores série controlados (*CSC*), os comutadores de carga, os reguladores de ângulo de fase (*RAF*), os compensadores estáticos (*SVC*) e os controladores unificados de fluxo de potência (*UPFC*). Esses controladores, em geral, possuem um bom desempenho durante a operação, tanto em regime permanente quanto em regime transitório [1].

Os controladores *FACTS* do tipo conversor de fonte de tensão (*VSC*) possuem algumas vantagens em relação aos baseados em impedância variável. Um bom exemplo é o controlador *STATCOM*, do tipo *VSC*, ser mais compacto que o controlador (*SVC*), tipo de impedância variável, e ainda assim possui um melhor desempenho operacional, podendo fornecer suporte de reativos mesmo em valores baixos de tensão no seu barramento, e ainda fornecer potência ativa se estiver conectado a uma fonte de energia nos seus terminais DC [6].

Os dispositivos *FACTS* que se baseiam na estratégia de controle *VSC* tem como requisito a utilização de dispositivos auto-comutadores com semi-condutores de alta potência, como os tiristores Gate Turn-off (*GTO*), os Transistores Bipolares de Porta Isolada (*IGBT* - *Insulated Gate Bipolar Transistor*), os Tiristores Comutados de Portas Integradas (*IGCT* - *Integrated Gates Commutated Thyristors*). Os tiristores mais

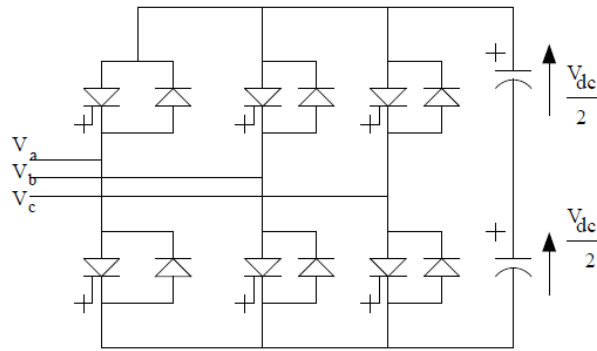


Figura 4.6: Circuito trifásico de um controlador VSC [6].

simples não tem a capacidade de exercer as funções necessárias para o VSC, não podendo ser usado, mesmo assim é possível encontrar tiristores de alta tensão, com menores perdas e um preço mais barato. Entretanto, o avanço técnico dos semi-condutores de alta potência, como o carboneto de silício, o que resultará em um maior crescimento da eletrônica de potência, levando ao uso generalizado dos dispositivos baseados no controle VSC no futuro. A Figura (4.6) mostra o esquema do circuito trifásico de um controlador *FACTS* do tipo VSC [6, 15].

Além do tipo de controle que será utilizado, outro fator de grande importância na escolha do dispositivo *FACTS* que será empregado no sistema é o tipo de conexão. Os controladores *FACTS* ligados em *shunt* atuam na linha de transmissão como uma reatância capacitiva variável, consumindo ou fornecendo reativos de acordo com as necessidades do sistema. Com isso, esses dispositivos podem ser representados como fontes de corrente ou tensão em paralelo com o sistema, controlando os níveis de tensão nos barramentos. Já os controladores *FACTS* ligados em série realizam o controle do fluxo de potência nas linhas em que atuam, aumentando de maneira significativa a quantidade de energia transportada pelo sistema, podendo ser representados como fontes de corrente ou tensão ligados em série na rede [1, 6].

Neste trabalho, uma análise mais específica será focada nos controladores *FACTS* conectados em *shunt* de impedância variável, mais especificamente os controladores estáticos variáveis (SVC). Para a simulação dos dispositivos SVC, é necessário saber alguns princípios de operação e de como é feita essa modelagem desse controlador. A partir dessas simulações, é possível determinar a influência dos controladores *FACTS* na confiabilidade de um sistema elétrico de potência [6].

4.2 Compensador Estático de Reativos (SVC - Static Var Compensator)

Os dispositivos SVC são controladores *FACTS* de primeira geração que utilizam como base a impedância variável, sendo conectado com ligação *shunt* no sistema de potência. Esse dispositivo pode gerar ou absorver potência reativa da rede a partir de um controle por tiristores, cuja a saída é ajustada para o intercâmbio de corrente capacitiva ou reativa para manter o controle de parâmetros específico do sistema de potência, geralmente a tensão de um barramento [6, 7].

Como parte da primeira geração de controladores *FACTS*, os dispositivos SVC foram desenvolvidos no

início dos anos 70, com o objetivo de ser empregado no setor industrial para o controle de *flicker* e regulação de tensão durante a partida de grandes motores. Com o passar do tempo, a eletrônica de potência começou a se desenvolver mais rapidamente, com isso os dispositivos *SVC* passaram a ser utilizados em sistemas de potência. No Brasil, atualmente, são utilizados mais de dez dispositivos *SVC*, que estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), com uma maior concentração nas regiões nordeste e centro-oeste [6, 7].

Um dos destaques dos dispositivos *SVC* é o controle rápido e contínuo de potência reativa, o que pode ser de grande importância para determinadas condições do sistema. A aplicação do controlador *SVC* tem o objetivo de realizar as seguintes funções para o sistema elétrico de potência:

- Controlar sobretensões temporárias à frequência industrial.
- Prevenir colapsos de tensão.
- Aumentar a confiabilidade do sistema de potência.
- Amortecer oscilações subsíncronas.
- Reduzir os desbalanços de tensão e de corrente.

Para analisar a influência do controlador *SVC* nos sistemas de potência, são realizadas simulações computacionais de sistemas que utilizam esses dispositivos. Com isso, são realizados estudos dos princípios de operação e da modelagem do controlador *SVC*.

4.2.1 Princípios de Operação

O *SVC* é um controlador composto por reatores e capacitores, conectados em *shunt* no sistema, em conjunto com transformadores e dispositivos de chaveamento e controle. A união desses componentes define um sistema de compensação de potência reativa, que pode ser controlado até um determinado limite específico, mantendo a tensão de um barramento controlada em uma determinada faixa. Diferente dos compensadores síncronos, o *SVC* não possui componente principal girante, sendo caracterizado como um compensador estático [7].

Existem diferentes arranjos para o *SVC*, nos mais simples os capacitores e reatores podem ser fixos (*FC* - *Fixed Capacitor* ou *FR* - *Fixed Reactor*) ou então chaveados a tiristores (*TSC* - *Thyristor Switched Capacitor* ou *TSR* - *Thyristor Switched Reactor*). O componente de maior importância para o *SVC* é o reator controlado a tiristor (*TCR* - *Thyristor Controlled Reactor*), pois ele atua no controle contínuo da potência reativa do *SVC*. Isso é feito através do controle do ângulo de disparo das válvulas dos tiristores. A Figura (4.7) mostra o circuito elétrico de um *SVC* composto por um *TCR* e um *TSC* [7].

Os capacitores chaveados a tiristores (*TSC*) são constituídos por bancos de capacitores separados em unidades de tamanho adequado, sendo que cada uma dessas unidades são chaveadas por tiristores. Neste tipo de chaveamento, os tiristores são disparados apenas quando a condição de tensão zero é obtida pela chave semicondutora. Devido essa característica, os tiristores podem apenas conectar ou desconectar o banco de capacitores ao sistema de potência. Como consequência, a potência reativa é injetada na rede

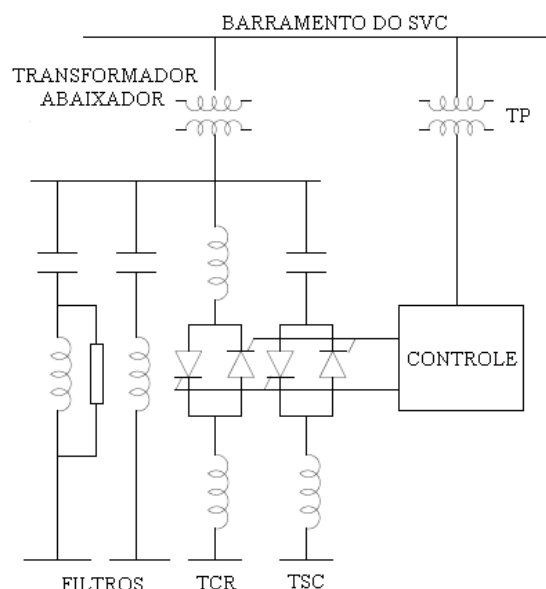


Figura 4.7: Circuito de um controlador SVC do tipo TCR - TSC [6].

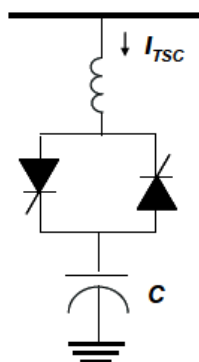


Figura 4.8: Esquema do capacitor chaveado a tiristores (TSC)[7].

pelo banco chaveado de forma descontínua. Pelo fato do chaveamento ser feito em uma frequência muito baixa, os harmônicos gerados não representam um grande problema para o sistema elétrico, sendo uma característica importante do TSC. A Figura (4.8) mostra o esquema do elemento básico TSC [7].

Os tiristores do TSC podem só operar em dois estados, bloqueado ou em condução total. No TSC, só há circulação de corrente no capacitor se os tiristores estiverem em condução total, caso contrário, o circuito estará aberto. Para evitar a sobre corrente de chaveamento nos tiristores, o chaveamento do capacitor é feito quando a tensão da barra passa por zero. Percebe-se então, que no TSC, o capacitor pode estar totalmente inserido no sistema ou estar fora dele, mostrando que não há controle de potência reativo, e sim controle de chaveamento. Desta forma, quando é necessário variar a capacitância do sistema são utilizados vários bancos de capacitores chaveados em paralelo.

O reator controlado a tiristores (TCR) é considerado a base do SVC, sendo composto por um reator fixo de indutância L em série com uma chave tiristorizada bidirecional. Na realidade, para atender às restrições de isolamento em um determinado nível de potência, a válvula tiristorizada é composta por vários tiristores

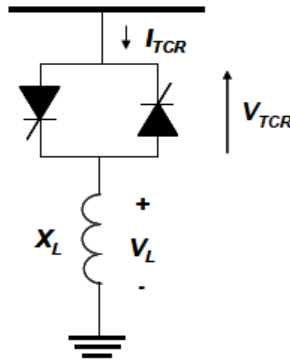


Figura 4.9: Esquema do reator controlado a tiristores (*TCR*) [7].

ligados em série. O bloqueio dessa válvula é realizado sempre que a corrente passa por zero, até que o pulso do gatilho seja reaplicado. O *TCR* realiza o controle do ângulo de disparo α dos tiristores, produzindo uma reatância indutiva equivalente, continuamente variável. A Figura (4.9) mostra o esquema do *TCR* [7].

O ângulo de disparo α representa o atraso no disparo da válvula e é medido em relação ao pico da tensão aplicada ao *TCR* em cada semi-ciclo. Quando o ângulo α é igual a zero, os tiristores disparam no pico da tensão aplicada, conduzindo por todo o semi-ciclo, o que resulta em uma corrente essencialmente senoidal e reativa. Já quando $0 < \alpha < 90^\circ$, existe uma condução parcial e a corrente no *TCR* diminui com o aumento do ângulo de disparo α , o que equivale a um aumento da reatância efetiva no *TCR*. Com isso, é possível perceber que o *TCR* se comporta como uma susceptância controlável [7].

Em relação ao sistema de potência, o *SVC* equivale a um capacitor e um indutor que são ligados em derivação, sendo ajustados para realizar o controle de reativos e de tensão de acordo com a necessidade do sistema. Um controlador *SVC* ideal possui uma capacidade ilimitada de geração ou absorção de reativos, pois a capacitância e a indutância podem variar infinitamente. Considerando um caso real, no *TCR*, a corrente no reator é variada através do controle do ângulo de disparo da válvula tiristorizada, enquanto no *TSC*, a curva de tensão pela corrente varia de acordo com o número de capacitores em paralelo. Com isso, a curva característica de tensão pela corrente de *SVC*, do tipo *TCR-TSC*, será a composição das curvas características do *TCR* e do *TSC*, como pode ser visualizado na Figura (4.10).

A partir da curva característica na Figura (4.10), percebe-se que a máxima geração de potência reativa do *SVC* é obtida quando o *TCR* é bloqueado, pois isso equivale a $\alpha = 90^\circ$. Para diminuir a potência reativa gerada pelo *SVC*, é necessário reduzir o ângulo de disparo α para que a corrente no *TCR* aumente. No caso da potência nominal do reator ser superior à do capacitor, reduções adicionais no ângulo de disparo α fazem com que a saída líquida do *SVC* seja indutiva, sendo determinada pela diferença entre as potências reativas do *TCR* e *TSC*. A máxima absorção de potência reativa do *SVC* acontece quando o *TCR* conduz todo o ciclo, isso ocorre quando o ângulo de disparo α é nulo [7].

4.2.2 Modelo Matemático do *SVC*

A construção do modelo de controlador *SVC* vai depender da natureza do sistema elétrico de potência e de sua performance. Para o estudo de estabilidade, não é necessário considerar a comutação das válvulas

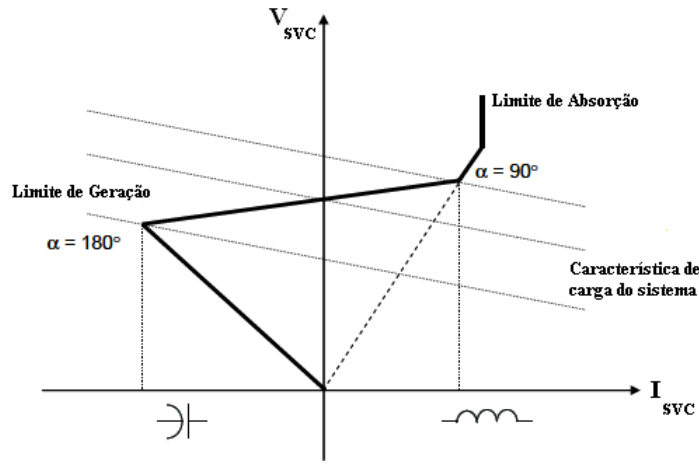


Figura 4.10: Curva característica de tensão pela corrente do (SVC) [7].

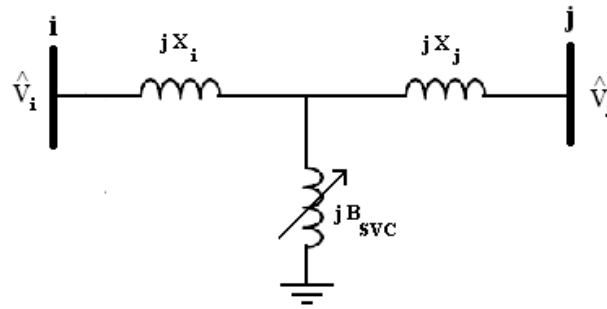


Figura 4.11: Sistema de potência analisado para a modelagem do SVC [6]

tiristoras, e assume-se que o SVC gera apenas a corrente fundamental. Neste trabalho, considera-se um modelo simples para o controlador SVC. Esse modelo se baseia nas equações utilizadas para a compensação de reativos em um sistema de potência composto por dois barramentos, as barras i e j , ligados por uma rede de transmissão. O controlador SVC é implementado no meio da linha de transmissão, como pode ser visualizado na Figura (4.11), que mostra o sistema de potência analisado para a construção do modelo de SVC.

Para esse modelo, considera-se um controle contínuo sobre a susceptância B_{SVC} do dispositivo conectado em paralelo com a linha de transmissão. A expressão para a susceptância B_{SVC} do controlador é composto por dois termos, como mostrado na Equação (4.5) [16].

$$B_{SVC} = B_0 + \Delta B_{SVC} \quad (4.5)$$

O termo B_0 é uma constante que representa a susceptância do SVC no regime permanente, enquanto o termo ΔB_{SVC} é a susceptância controlada e modulada pelo SVC. Com esses termos e o esquema da Figura (4.11), é possível determinar a reatância equivalente entre os barramentos i e j a partir da Equação (4.6) [16].

$$x_{ij} = x_i + x_j - x_i x_j B_0 - x_i x_j \Delta B_{SVC} \quad (4.6)$$

Como os termos x_i , x_j e B_0 são constantes, tem-se a seguinte consideração:

$$x_0 = x_i + x_j - x_i x_j B_0$$

Com isso, a expressão para a reatância entre os barramentos i e j fica da seguinte forma:

$$x_{ij} = x_0 - x_i x_j \Delta B_{SVC} \quad (4.7)$$

Para a modelagem do controlador, é interessante trabalhar com a susceptância entre os barramentos i e j . Essa susceptância é o inverso da reatância entre os barramentos, sendo expressa pela Equação (4.8) [16].

$$b_{ij} = \frac{1}{x_0 - x_i x_j \Delta B_{SVC}} \quad (4.8)$$

A reatância x_0 é um termo constante, logo a susceptância b_0 também é uma constante, sendo:

$$b_0 = \frac{1}{x_0}$$

A susceptância b_{ij} é composta por um termo constante, que representa a rede em regime permanente, e um termo de variável, que representa o controle do *SVC*. Com isso, a expressão da susceptância entre os barramentos pode ser composta pela constante b_0 somada a uma função de controle W , como mostrado na Equação (4.9) [16].

$$b_{ij} = b_0 + W = \frac{1}{x_0 - x_i x_j \Delta B_{SVC}} \quad (4.9)$$

A função de controle W é determinada pela lei de controle u_{SVC} de maneira proporcional com a constante b_0 . A expressão da função de controle é mostrada na Equação (4.10) [16].

$$W = b_0 u_{SVC} \quad (4.10)$$

Para a modelagem do controlador *SVC*, é importante determinar a expressão para a lei de controle u_{SVC} do dispositivo. Implementando a Equação (4.10) na Equação (4.9), e isolando o termo u_{SVC} , tem-se a Equação (5.1) para a lei de controle [16].

$$u_{SVC} = \frac{x_i x_j \Delta B_{SVC}}{x_0 - x_i x_j \Delta B_{SVC}} \quad (4.11)$$

Levando em conta os efeitos do controlador *SVC* no calculo do fluxo de potência entre os barramentos i e j , tem-se as seguintes expressões:

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

$$P_{ij} = (b_0 + W) V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (4.12)$$

A partir da Equação (4.12) é possível separar a potência em dois termos, um para a potência da rede e outro para a potência injetada pelo SVC. A contribuição de potência exercida pelo controlador SVC para a rede de transmissão é expressa pela Equação (4.13), mostrada logo abaixo [16].

$$P_{ij} = b_0 V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) + (b_0 u_{SVC}) V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j)$$

$$P_{ij} = b_0 V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) + P_{ij}^{SVC}$$

$$P_{ij}^{SVC} = (b_0 u_{SVC}) V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (4.13)$$

Os fatores mais importantes na compensação de reativos do sistema são a susceptância do controlador SVC e a sua lei de controle u_{SVC} . A partir da lei de controle é determinado o comportamento do controlador para manter o sistema estável. Um dos procedimentos para a definição da lei de controle para o controlador é feita a partir das funções de Lyapunov, entretanto, este tipo de função está fora do enfoque deste trabalho. Para a simulação do controlador *FACTS* nos sistemas analisados, foi utilizada a lei de controle com base no artigo *Application of Control Lyapunov Functions to Static Var Compesator*, de Mehrdad Ghandhari, sendo expresso pela Equação (4.14), mostrada abaixo [16, 10, 2].

$$u_{SVC} = K_{SVC} \sin(\delta) \omega \quad (4.14)$$

A implementação do controlador SVC no sistema influencia nas equações de potência devido a compensação de reativos. No caso da modelagem das máquinas síncronas, é necessário utilizar a lei de controle como um fator que atua sobre a potência elétrica do gerador. Com isso, as Equações (2.10), e de (2.13) á (2.16), que modelam o comportamento da máquina síncrona em um sistema sem controladores *FACTS* são alteradas quando estes são introduzidos no sistema elétrico. As expressões do modelo clássico (2º ordem) com o controlador SVC são mostrados nos conjuntos de Equações (4.15) e (4.16), enquanto as expressões do modelo de dois eixos (4º ordem) do sistema com SVC são mostrados nos conjuntos de Equações de (4.17) á (4.20).[12]

- Modelo Clássico com *FACTS*

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (4.15)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[P_{m_i} - (1 + u_{SVC}) \frac{E_i V_i}{x_{eq_i}} \sin(\delta_i - \theta_i) - \omega_{m_i} T_{am_i} \right] \quad (4.16)$$

- Modelo Dois Eixos com *FACTS*

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (4.17)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} \left[P_{m_i} - (1 + u_{SVC}) \left(\left(\frac{1}{x'_{d_i}} \right) E'_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - \left(\frac{1}{x'_{q_i}} \right) E'_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - \left(\frac{x_{d_i} - x'_{d_i}}{2x'_{d_i} x'_{q_i}} \right) V_i^2 \sin(\delta_i - \theta_i) \right) - \omega_{m_i} T_{ami} \right] \quad (4.18)$$

$$\dot{E}'_{q_i} = \frac{1}{T'_{do_i}} \left[E_{fd_i} - \left(\frac{x_{d_i}}{x'_{d_i}} \right) E'_{q_i} + \left(\frac{x_{d_i} - x'_{d_i}}{x'_{d_i}} \right) V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \right] \quad (4.19)$$

$$\dot{E}'_{d_i} = \frac{1}{T'_{qo_i}} \left[\left(\frac{x_{q_i}}{x'_{q_i}} \right) E'_{d_i} + \left(\frac{x_{q_i} - x'_{q_i}}{x'_{q_i}} \right) V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \right] \quad (4.20)$$

Capítulo 5

Simulações e Resultados Experimentais

Mediante o uso dos conceitos dos Capítulos 2, 3 e 4, que se referem a modelagem do sistema, a análise de estabilidade transitória e aos controladores *FACTS*, respectivamente, é possível simular o comportamento de um sistema elétrico de potência sujeito a uma grande perturbação e implementar métodos para aumentar a confiabilidade desse sistema. A simulação é feita a partir da resolução das equações diferenciais e algébricas que modelam o sistema, para isso são elaborados rotinas computacionais que realizam os cálculos necessários. Neste trabalho as rotinas são desenvolvidas através do *MatLab*, pois é um *software* que possui muitas das ferramentas matemáticas necessárias para a resolução do problema.

As simulações computacionais foram realizadas para a análise de dois tipos de sistema: o máquina *vs* barramento infinito e o preservando a estrutura da rede. O caso do sistema máquina *vs* barramento infinito destaca-se pelo fato de ser o tipo mais simples de sistema a ser analisado, enquanto o no caso do sistema preservando a estrutura da rede existe uma maior complexidade para realizar sua análise. As simulações desses sistemas possuem casos onde os controladores *FACTS* são implementados e casos onde eles não são utilizados, isso é feito para analisar a diferença entre sistemas que não possuem os equipamentos *FACTS* em relação aos que possuem, podendo assim verificar a influência desses dispositivos na estabilidade do sistema elétrico de potência. Além disso, na modelagem das máquinas síncronas, são utilizados diferentes modelos para as simulações do sistema elétrico, com intuito analisar os casos o mais próximo de um sistema real.

5.1 Sistema Máquina *vs* Barramento Infinito

A estrutura de sistema elétrico mais simples de realizar a análise de estabilidade é o máquina *vs* barramento infinito. Isso se deve pelo fato da estrutura do sistema elétrico ser simplificada, pois as impedâncias da rede são reduzidas aos nós dos geradores do sistema, que é composto apenas por uma máquina síncrona ligada diretamente a um barramento infinito. Esse tipo de análise é adequada quando o foco do estudo está nas máquinas síncronas ligadas ao sistemas, pois os barramentos da rede são reduzidos.

O barramento infinito é definido como uma máquina infinita, possuindo a capacidade de geração de potência ilimitada com uma inércia grande. Isso significa que a velocidade angular do barramento infinito é constante, sem depender da potência fornecida à rede. Desta forma, o barramento infinito é uma refe-

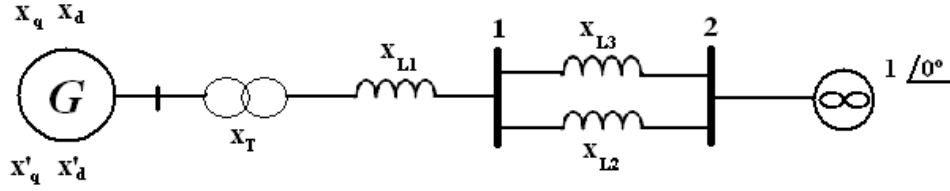


Figura 5.1: Esquema elétrico unifilar do sistema máquina *vs* barramento infinito.

rência angular do sistema. Para a análise de estabilidade transitória, os barramentos infinitos podem ser considerados grandes sistema quando interligadas a pequenas máquinas [4].

O sistema máquina *vs* barramento infinito é composto por um gerador síncrono que é ligado a um transformador de reatância 0.1 p.u. Esse transformador é ligado no barramento 1, que é ligado ao barramento 2 através de duas linhas de transmissão, onde cada uma possui reatância de 0.4 p.u. O barramento infinito esta ligado ao barramento 2, e possui uma tensão de 1 p.u e um ângulo de 0° como referência para o sistema. A Figura (5.1) mostra o esquema elétrico unifilar do sistema elétrico analisado.

Para a análise de estabilidade, considera-se que ocorre um curto-circuito trifásico em uma das linhas de transmissão no tempo $t = 5s$, esse curto é eliminado no tempo t_a a partir da abertura dos disjuntores localizados nas extremidades das linhas. A máquina síncrona fornece uma potência ativa de 0.8 p.u, além de possuir uma constante de inércia $M = 5s$ e uma constante de amortecimento $D = 0.01Ns/m$ [4].

Com isso, os dados de entrada de base para o sistema máquina *vs* barramento são:

- Reatância do transformador: $x_t = 0.1$ p.u
- Reatâncias da linha: $x_{L1} = 0.2$ p.u, $x_{L2} = 0.4$ p.u, $x_{L3} = 0.4$ p.u
- Reatâncias da máquina: $x_d = 0.4245$ p.u, $x_q = 1.5845$ p.u
- Reatâncias transitórias da máquina: $x'_d = 0.2$ p.u, $x'_q = 1.04$ p.u
- Tensão do barramento infinito: $V_{inf} = 1$ p.u
- Ângulo do barramento infinito: $\theta_{inf} = 0$
- Potência mecânica fornecida pela máquina: $P_m = 1$ p.u
- Constante de inércia da máquina: $M = 5$ s
- Constante de amortecimento: $D = 0.01$ N s/m
- Constantes de tempo: $T'_d = 6.66$ s, $T'_q = 0.44$ s

A simulação do sistema máquina *vs* barramento infinito será realizada para dois tipos de modelos matemáticos, que são: modelo clássico, modelo dois eixos. Os modelos clássico e de dois eixos são tipos de modelagem de gerador síncrono que e utilizam o método passo a passo para a determinação da estabilidade. Cada um deles utiliza conjuntos distintos de equações diferenciais, variáveis e constantes para

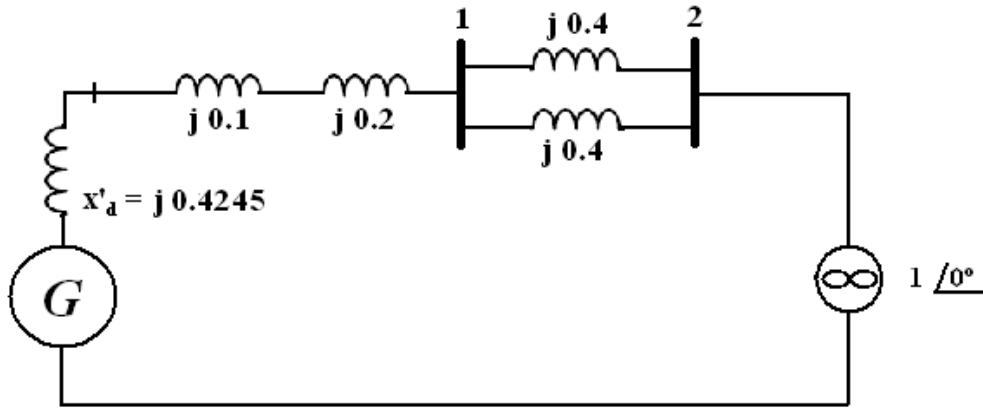


Figura 5.2: Circuito elétrico pré-falta do sistema no modelo clássico sem *FACTS*.

a elaboração do sistema elétrico. Para cada um desses modelos de máquina síncrona, o sistema é simulado sem e com o controlador *FACTS*, podendo assim verificar a influência desse dispositivo na estabilidade do sistema [4, 9].

5.1.1 Modelo Clássico sem *FACTS*

O modelo clássico é a representação mais simples de modelagem de máquina síncrona. Ele é composto por duas equações diferenciais, em relação ao ângulo δ e o desvio de velocidade angular ω do gerador, como mostrado na Equação (2.10), o que caracteriza o modelo como de 2ª ordem. A Figura (5.2) mostra esquema da situação pré-falta do sistema no caso do modelo clássico, onde o dispositivo *FACTS* não é utilizado [9].

Utilizando os dados de entrada do sistema é possível resolver as equações diferenciais na situação pré-falta. Entretanto, antes de resolver o sistema é necessário determinar as condições iniciais do sistema pré-falta e em falta. Isso é feito através de um fluxo de potência, que calcula os pontos de equilíbrio do sistema. O algoritmo do fluxo de potência pode ser visualizado no anexo deste trabalho.[8]

Após o cálculo do fluxo de potência, as seguintes condições iniciais para o sistema em falta são obtidas:

- $\delta(0) = 0.7405rad$
- $\omega(0) = 0$

Utilizando essas condições iniciais, a solução das equações diferenciais do modelo clássico é calculada. Esse cálculo é feito a partir de um Runge-Kutta de 4ª ordem que pode ser aplicada através do comando *ode45* do MatLab. Com isso, obtêm-se o comportamento do ângulo δ e do desvio de velocidade ω na situação pré-falta, que podem ser visualizados nos primeiros 5 segundos da simulação. O último resultado do pré-falta é utilizado como condição inicial para a situação em falta.

O curto-circuito trifásico ocorre no meio de uma das linhas de transmissão do sistema máquina vs barramento infinito, no tempo $t = 5s$, iniciando assim a situação em falta. Com isso, o formato do circuito

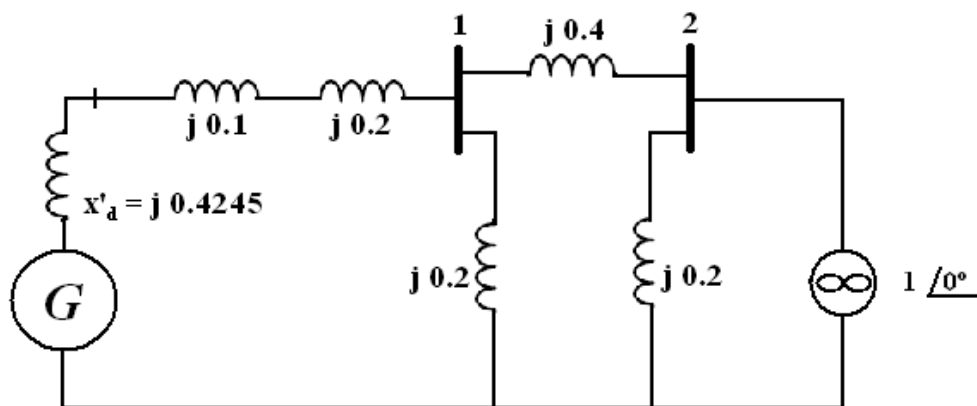


Figura 5.3: Circuito elétrico em falta do sistema no modelo clássico sem *FACTS*.

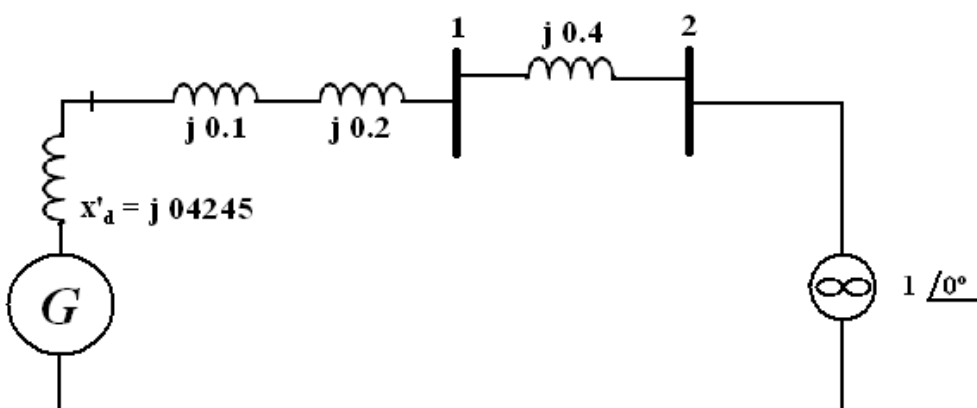


Figura 5.4: Circuito elétrico em pós-falta do sistema no modelo clássico sem *FACTS*.

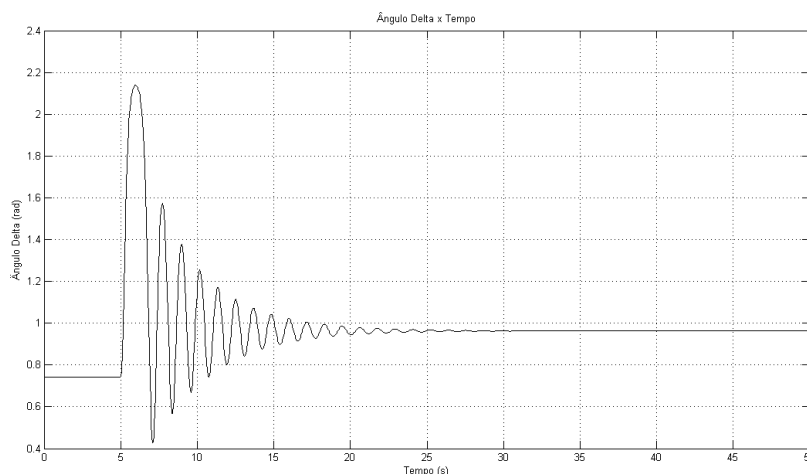


Figura 5.5: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.2s$ (modelo clássico sem *FACTS* - SMI).

elétrico é modificado, de forma que a reatância equivalente do sistema é alterado. A Figura (5.3) mostra o esquema do circuito na situação em falta.

Para determinar a reatância equivalente nesse caso é necessário realizar uma transformação estrela-triângulo no barramento 1. Com essa reatância equivalente é realizado o calculo para resolver as equações diferenciais do sistema para a situação em falta, sendo utilizado o mesmo modelo matemático e as mesmas ferramentas numéricas que no caso pré-falta. Com isso é possível obter o comportamento do sistema elétrico durante o curto-circuito trifásico. Os últimos resultados obtidos do sistema em falta são utilizados como condições iniciais para o caso pós-falta.

Com a eliminação do curto-circuito do sistema elétrico sendo realizado no 0.2 segundos após a falta ($t_a = 0.2s$), inicia-se a situação pós-falta. Como a falta foi eliminada através da abertura de disjuntores, a representação do circuito elétrico do sistema é alterada em relação ao original. Nesse caso a segunda linha de transmissão é retirada, como mostrada na Figura (5.4).

A análise da situação pós-falta é a mais importante no estudo de estabilidade transitória, pois por ela que é possível verificar se o sistema permanece estável ou se torna instável. Com esse estudo pode-se obter os valores, para as variáveis e constantes que influenciam o sistema, de maneira que a este permaneça estável. Para as condições já impostas, os seguinte resultados gráficos foram obtidos para o ângulo da máquina e o desvio de velocidade.

A Figura (5.5) mostra o resultado gráfico do ângulo da máquina em função do tempo, onde ângulo cresce no instante que ocorre falta. Após a eliminação da falta o ângulo começa a convergir de maneira oscilatória até atingir um novo ponto de operação de 0.9632 rad. Enquanto a Figura (5.6) mostra o resultado gráfico do desvio de velocidade em relação ao tempo. Assim como no caso do ângulo da máquina, o desvio de velocidade aumenta a partir do inicio da falta, e com o fim da falta o desvio de velocidade começa a convergir até se tornar nula novamente. Com isso, verifica-se que o sistema elétrico continua estável, mesmo após a falta.

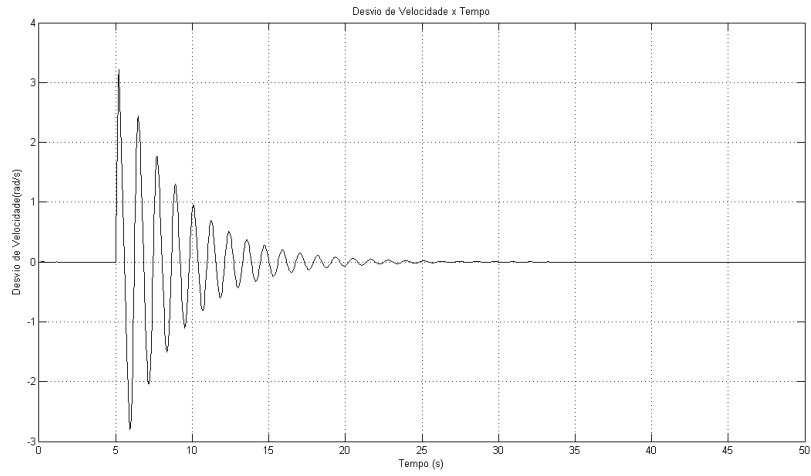


Figura 5.6: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.2s$ (modelo clássico sem *FACTS* - SMBI).

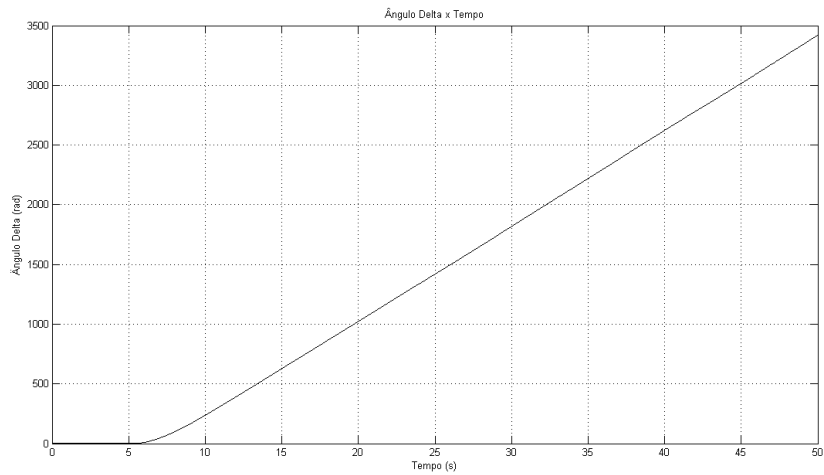


Figura 5.7: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.4s$ (modelo clássico sem *FACTS* - SMBI).

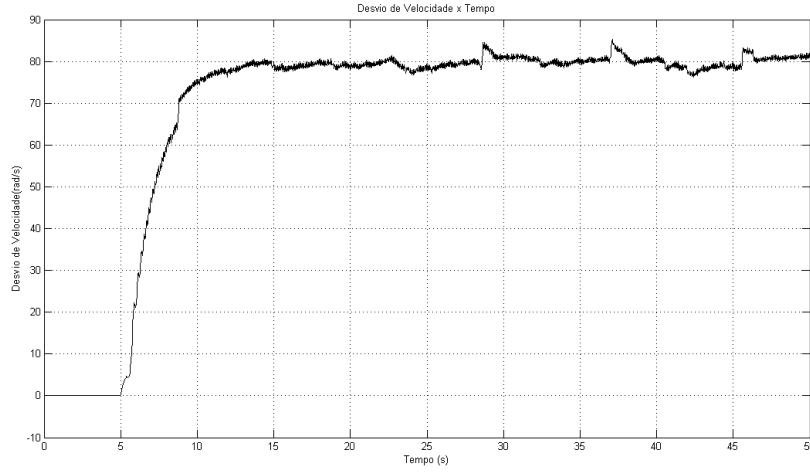


Figura 5.8: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.4s$ (modelo clássico sem *FACTS* - SMI).

Para uma melhor análise do sistema, as simulações são feitas repetidamente, aumentando o tempo de abertura (t_a) e mantendo as outras condições. Os resultados obtidos por uma simulação realizada com um tempo de abertura de 0.4 s são mostrados nas Figuras (5.7) e (5.8).

Analisando os resultados da simulação com o $t_a = 0.4s$, verifica-se pela Figura (5.7) que o ângulo da máquina começa a crescer a partir da falta, e mesmo após a eliminação da falta o ângulo continua crescendo. Pela Figura (5.8) percebe-se que com a ocorrência da falta o desvio de velocidade aumenta até começar a oscilar próximo dos 80 rad/s, não voltando ao desvio de velocidade nula. Essas características indicam que para $t_a = 0.4s$ o sistema é instável.

A partir de muitas variações das simulações, o tempo de abertura crítico foi determinado, sendo $t_{cr} = 0.258s$. Com isso, sabe-se que enquanto o tempo de abertura dos disjuntores for menor do que t_{cr} o sistema será estável. Entretanto, caso o tempo de abertura o que t_{cr} o sistema se tornará instável.

5.1.2 Modelo de Dois Eixos sem *FACTS*

O método de resolução da estabilidade do sistema elétrico utilizando o modelo de dois eixos é basicamente o mesmo do modelo clássico. A principal diferença é o conjunto de equações diferenciais que devem ser utilizados. O modelo de dois eixos possui quatro equações diferenciais, relacionadas ao ângulo δ , o desvio de velocidade ω e as tensões transitórias direta e de quadratura, E'_d e E'_q , respectivamente, caracterizando o modelo como de 4ª ordem. Essas expressões que descrevem o modelo de dois eixos, para um sistema sem controle por *FACTS*, podem ser visualizadas nas Equações de (2.13) a (2.16) [9].

Os esquemas dos circuitos elétricos nas situações pré-falta, em falta e pós-falta, para o modelo dois eixos é o mesmo do modelo clássico e mostram-se nas Figuras (5.2),(5.3) e (5.4). Entretanto, o modelo de dois eixos considera a variação das tensões direta e de quadratura da máquina, fazendo com que as reatâncias, x_d e x_q , e as reatâncias transitórias, x'_d e x'_q , sejam consideradas na análise de estabilidade.

O comportamento do sistema em regime permanente e condições iniciais para o caso em falta, obtidos

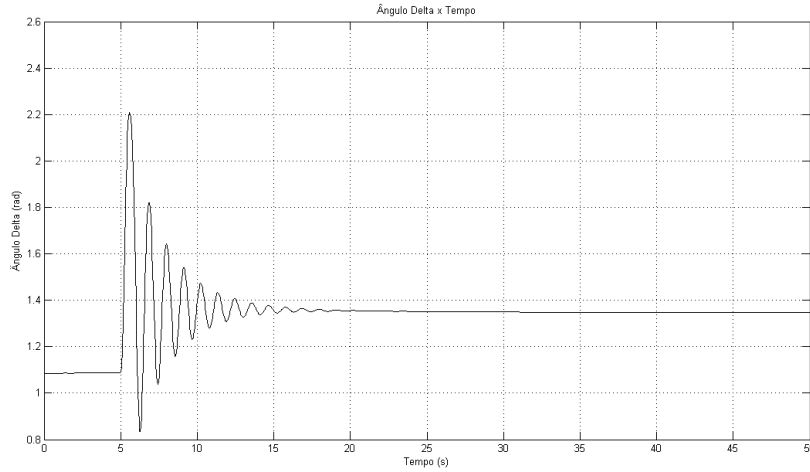


Figura 5.9: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - *SMBI*).

pelo calculo do fluxo de potência, são:

- $\delta(0) = 1.085rad$
- $\omega(0) = 0$
- $E'_q(0) = 1.0958p.u$
- $E'_d(0) = -0.231p.u$

Com essas condições iniciais, os cálculos do comportamento das quatro variáveis são realizados, isso é feito através da solução das equações diferenciais pela função *ode45* da ferramenta *MatLab*. Assim como foi feito no modelo clássico, primeiramente os cálculos do sistema em regime permanente (pré-falta) são feitos durante os primeiros 5 segundos de simulação, para obter as condições iniciais da situação em falta. Em seguida os cálculos do sistema em falta são realizados durante o tempo de abertura de 0.3 segundos ($t_a = 0.3s$), obtendo dessa maneira as condições iniciais para o pós falta. Com isso, é o possível obter o comportamento do sistema pós-falta, e verificar se este permanece estável ou desestabilizou. A partir da programa elaborado em *MatLab*, os resultados gráficos são obtidos para as quatro variáveis do sistema, sendo mostrados nas Figuras (5.9), (5.10), (5.11) e (5.12).

A Figura (5.9) mostra ângulo da máquina aumentando com o inicio da falta do sistema, após a eliminação da falta o ângulo começa a convergir de maneira oscilatória até atingir o novo ponto de equilíbrio de 1.35 rad. Já a Figura (5.10) mostra o crescimento do desvio de velocidade após a falta do sistema, quando o distúrbio é corrigido, o desvio de velocidade começa a diminuir, oscilando até atingir o zero. Esses resultados obtidos no modelo de dois eixos são praticamente os mesmos dos resultados do modelo clássico para o sistema estável.

O comportamento transitório das tensões de quadratura e direta do sistema são mostrados nas Figuras (5.11) e (5.12), respectivamente. Verifica-se pela Figura (5.11) que no instante que a falta ocorre a tensão

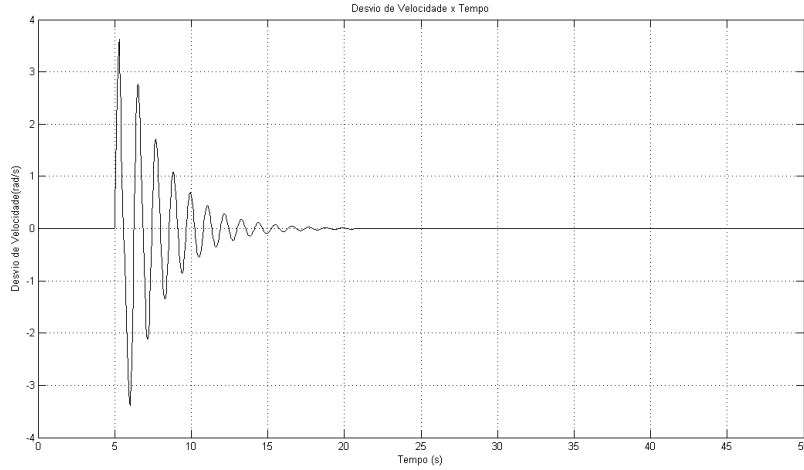


Figura 5.10: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - *SMBI*).

de quadratura E'_q aumenta ligeiramente, com a eliminação da falta a tensão E'_q desce rapidamente durante um pequeno instante, em seguida volta a crescer até estabilizar em aproximadamente 1.035 p.u. A tensão transitória direta E'_d , como mostrada na Figura (5.12), possui um comportamento semelhante a tensão transitória de quadratura, onde um pequeno pico de tensão nos primeiros instantes da falta, logo em seguida a tensão diminui rapidamente até um ponto, em seguida começa a oscilar até estabilizar em um ponto de operação muito próximo ao do pré-falta.

Como o ângulo da máquina não divergiu, o desvio de velocidade manteve-se nulo e as tensões transitórias direta e de quadratura mantiveram-se próximas aos pontos de equilíbrio pré-falta, os resultados indicam que para o tempo de abertura dos disjuntores de 0.3 segundos o sistema se mantém estável. Assim como foi feito no modelo clássico, para melhores análises, a simulação do modelo de dois eixos é feita repetidamente, utilizando outros valores de tempo de abertura (t_a) e mantendo as condições básicas. Simulando o sistema elétrico para $t_a = 0.5s$, obtêm-se os resultados gráficos nas Figuras (5.13), (5.14), (5.15) e (5.16).

A partir os resultados da simulação do sistema com o $t_a = 0.5s$, verifica-se pela Figura (5.13) que o ângulo da máquina cresce a partir da falta, e continua a crescer após a eliminação da falta. A Figura (5.14) mostra que com a ocorrência da falta o desvio de velocidade aumenta até começar a oscilar próximo dos 80 rad/s. Com a falta a tensão transitória do eixo de quadratura dá um pequeno salto, quase desprezível, após a correção da falta ela decresce até começar a oscilar próximo á 0.91 p.u., como mostrado na Figura (5.15). No caso da tensão transitoria do eixo direto, mostrada na Figura (5.16), no momento que ocorre a falta ela começa a diminuir, após a correção da falta a tensão começa a oscilar próxima a zero.

Analisando esse caso, verifica-se que características do ângulo e do desvio de velocidade da máquina são as mesmas do caso instável do modelo clássico. As tensões transitorias de quadratura e direto adquirem pontos de operação muito afastados da situação pré-falta. Tudo isso indica que para $t_a = 0.5s$ o sistema elétrico com modelo de dois eixos é instável.

Assim como foi feito na análise do modelo clássico do sistema, muitas variações de simulações foram feitas. Com isso, foi determinado o tempo de abertura crítico, que é $t_{cr} = 0.324s$. Com isso, sabe-se que

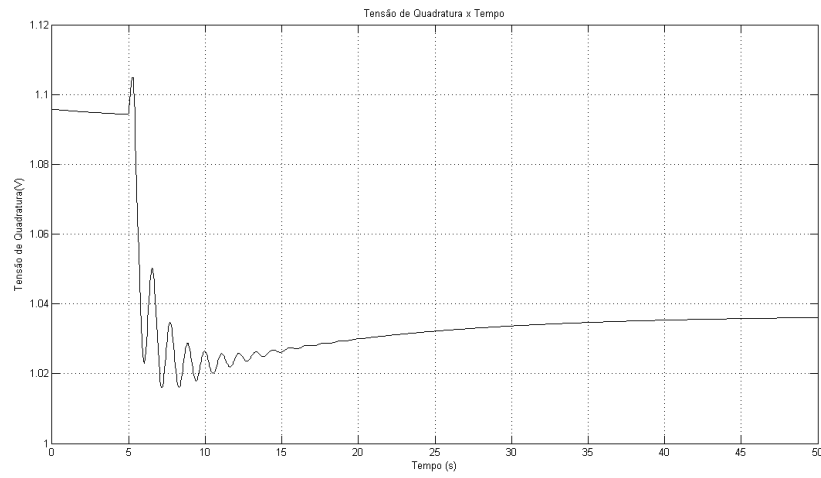


Figura 5.11: Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

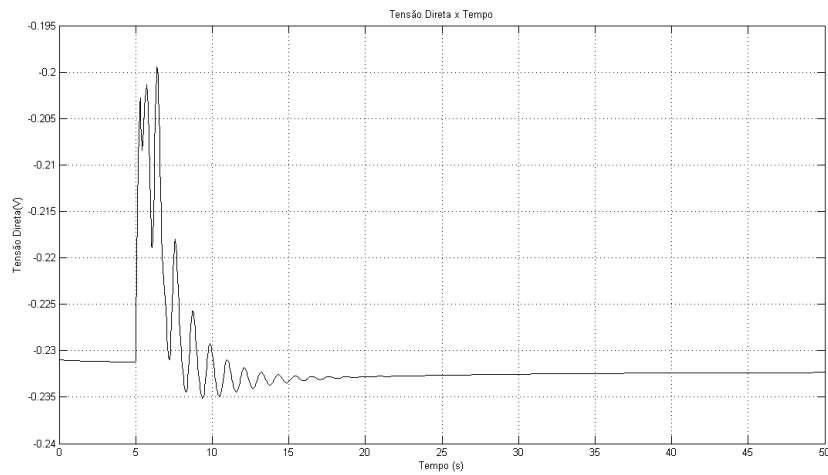


Figura 5.12: Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.3s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

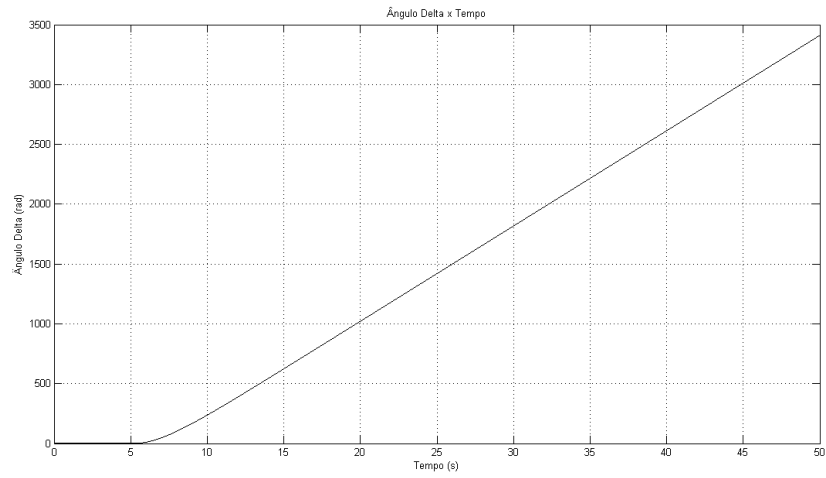


Figura 5.13: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

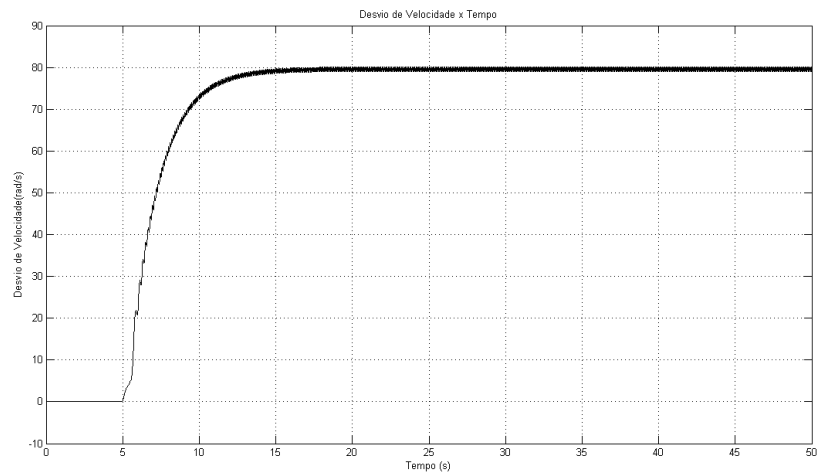


Figura 5.14: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

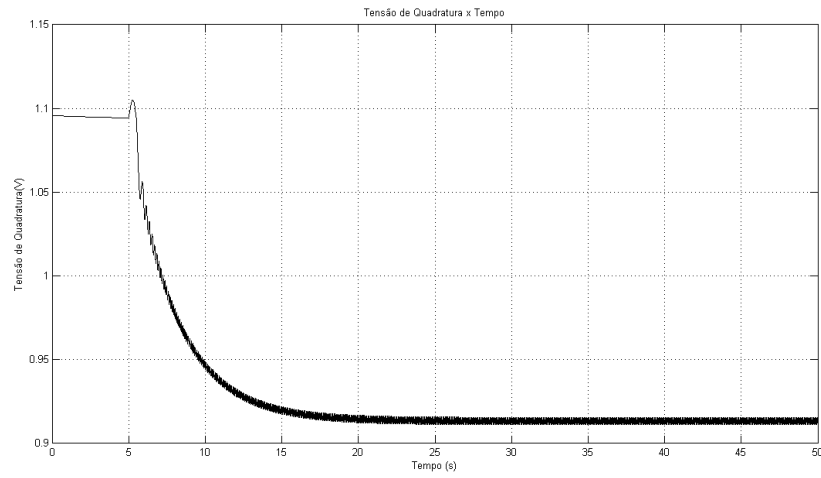


Figura 5.15: Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

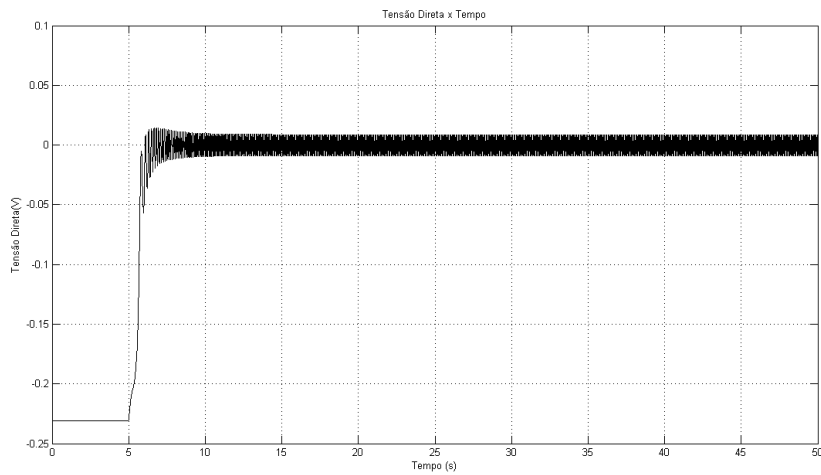


Figura 5.16: Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $t_a = 0.5s$ (modelo de dois eixos sem *FACTS* - SMBI).

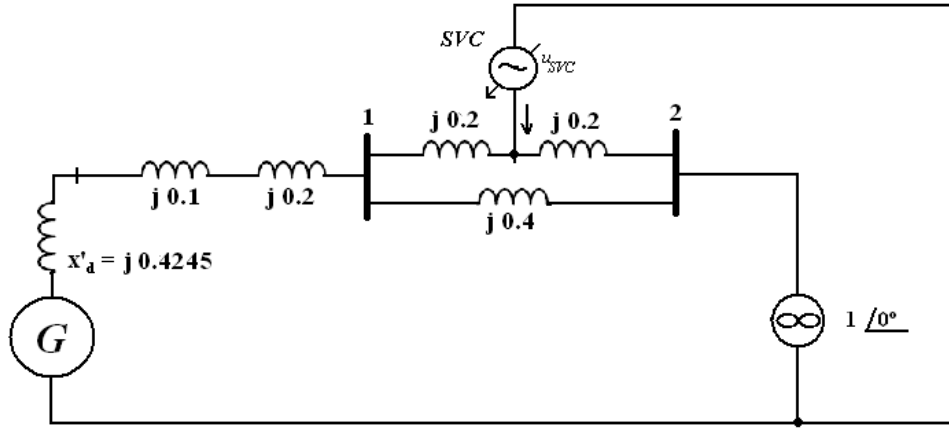


Figura 5.17: Circuito elétrico pré-falta do sistema no modelo clássico com *FACTS*.

enquanto o tempo de abertura dos disjuntores for menor do que $t_{cr} = 0.324s$ o sistema será estável, caso contrário o sistema elétrico será instável.

5.1.3 Modelo Clássico com *FACTS*

Para estudar a influência dos dispositivos *FACTS* na confiabilidade do sistema analisado, um compensador estático de reativos (*SVC*) é modelado e implementado na rede transmissão. Nessa simulação, o controlador *SVC* é conectado em um barramento no meio da linha de transmissão 1 e máquina síncrona utiliza o modelo clássico. O esquema elétrico do sistema máquina *vs* barramento infinito com o controle por *FACTS* pode ser visualizado na Figura (5.17).

Como nesse caso o sistema analisado utilizará o controle por *FACTS*, a formulação das equações diferenciais do modelo clássico é distinta do caso sem os *FACTS*. As expressões que definem o modelo clássico do gerador síncrono são as Equações (4.15) e (4.16). Nessas equações, o componente de maior importância é a lei de controle u_{SVC} , que define o comportamento do compensador de reativos. Essa lei de controle faz o modelo do controlador do tipo *SVC*, sua expressão pode ser visualizada na Equação (4.14).

$$u_{SVC} = K_{SVC} \sin(\delta) \omega$$

Na lei de controle expressa na Equação (4.14), deve-se destacar essa função depende do ângulo δ e do desvio de velocidade ω do gerador síncrono. Outro fator importante é a constante de ganho K_{SVC} , que está relacionado com o nível de compensação de reativos do controlador *SVC*. Para cada um dos valores da constante K_{SVC} , a estabilidade transitória do sistema se comportará de um maneira distinta. Para a primeira análise, utiliza-se a constante de compensação de reativos do controlador K_{SVC} com o valor de 0.15 [2].

Como no período pré-falta do sistema não ocorre nenhuma perturbação e o seu regime é permanente, as condições iniciais determinadas pelo calculo do fluxo de potência para o sistema analisado sem os *FACTS* é o mesmo para o sistema com *FACTS*. Com isso, tem-se as seguintes condições iniciais para a situação

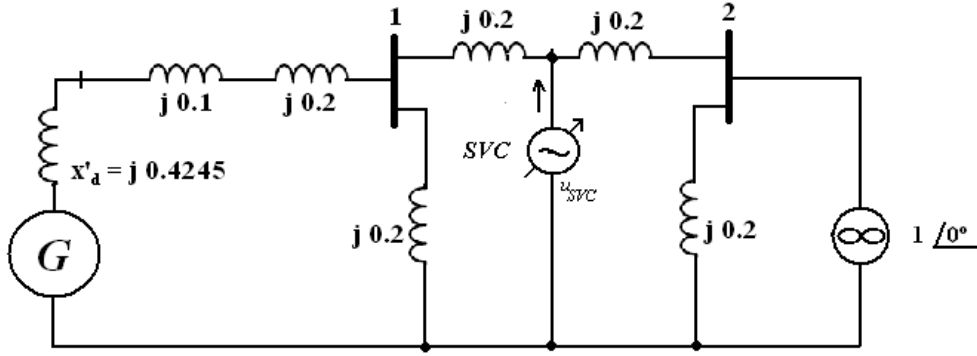


Figura 5.18: Circuito elétrico em falta do sistema no modelo clássico com *FACTS*.

pré-falta do sistema analisado.

- $\delta(0) = 0.7405 \text{ rad}$
- $\omega(0) = 0$

A partir dessas condições iniciais determina-se o comportamento do período pré-falta, que ocorre durante os primeiros 5 segundos da simulação. No instante seguinte aos 5 segundos, ocorre o curto-circuito trifásico no meio da linha de transmissão 2, iniciando dessa forma o intervalo de tempo que o sistema está em falta. A modificação na estrutura do circuito elétrico analisado causado pela falta trifásica pode ser visualizada no esquema mostrado na Figura (5.18). Como não ocorre alterações no sistema durante o pré-falta, as condições iniciais se preservam, sendo as mesmas condições iniciais para o sistema em falta.

Determinando a reatância equivalente do circuito com a falta trifásica, mostrado na Figura (5.18), é possível simular o sistema em falta a partir da solução das Equações diferenciais (4.15) e (4.16), do modelo clássico com *FACTS*, com as condições iniciais já determinadas. O tempo de simulação do sistema em falta é o mesmo que o tempo de abertura dos disjuntores, onde a falta é eliminada com a retirada da linha de transmissão 2. O comportamento do sistema pós-falta dependerá diretamente do tempo de abertura dos disjuntores, que para essa primeira análise é de 0.55 segundos ($t_a = 0.55 \text{ s}$).

Após a abertura dos disjuntores e retirada da linha de transmissão curto-circuitada, a falta é eliminada e inicia-se o pós-falta do sistema. A Figura (5.19) mostra o esquema do circuito elétrico analisado após a eliminação da falta trifásica do sistema. As condições iniciais do pós-falta são os últimos resultados obtidos no sistema em falta. Utilizando essas condições iniciais e a reatância equivalente do circuito pós-falta, é possível determinar a solução das equações diferenciais do modelo clássico com *FACTS*. Com isso, é possível visualizar o comportamento do sistema analisado no pós-falta.

Analisando o sistema no pós-falta é possível determinar se o sistema permanece estável, ou se está instável. A estabilidade do sistema dependerá diretamente com o tempo de abertura dos disjuntores, onde a falta é eliminada. Considerando as condições já impostas, foram obtidos os seguintes gráficos para o ângulo δ e o desvio de velocidade ω da máquina síncrona.

O comportamento do ângulo δ e da velocidade angular ω da máquina síncrona, com o sistema analisado

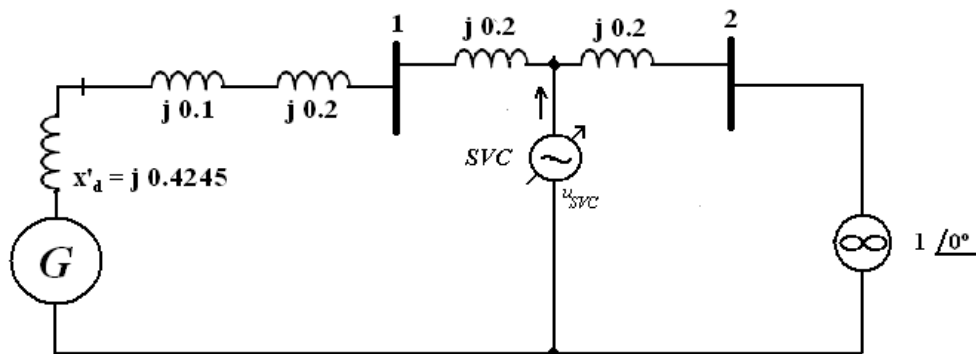


Figura 5.19: Circuito elétrico pós-falta do sistema no modelo clássico com *FACTS*.

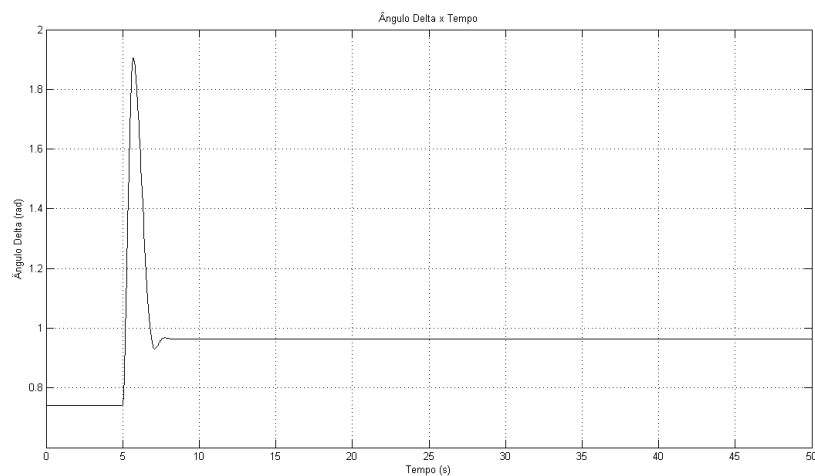


Figura 5.20: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.55$ s (modelo clássico com *FACTS* - SMI).

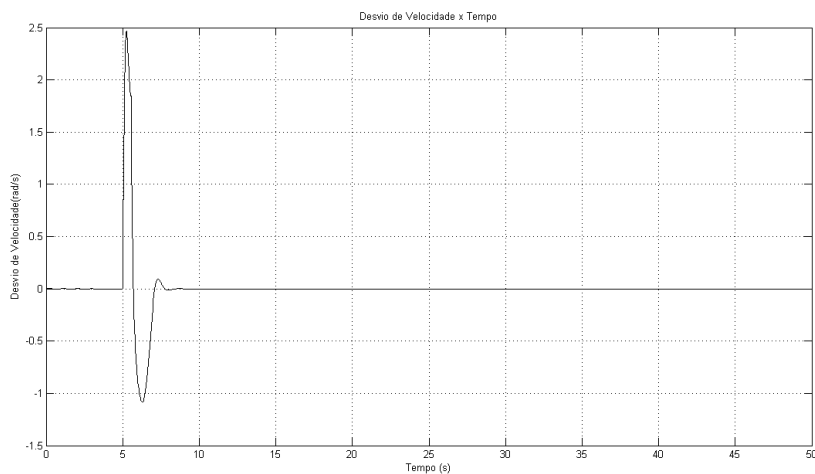


Figura 5.21: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.55$ s (modelo clássico com *FACTS* - SMI).

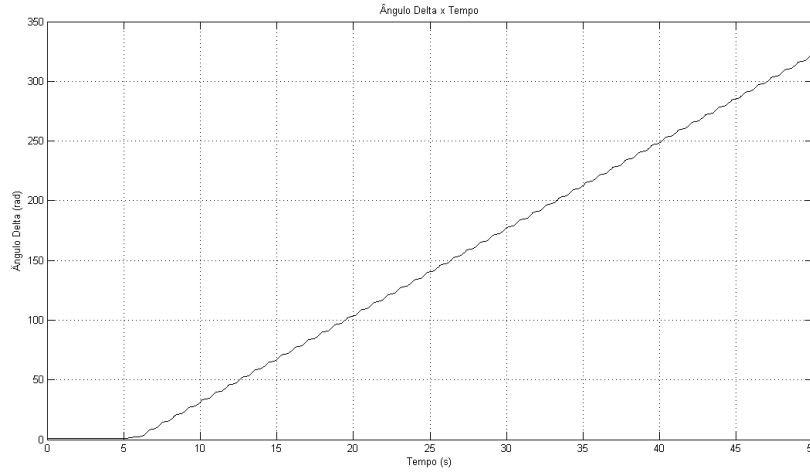


Figura 5.22: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.70s$ (modelo clássico com *FACTS* - *SMBI*).

utilizando $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.55s$, podem ser visualizados a partir dos gráficos das Figuras (5.20) e (5.21), respectivamente. Na Figura (5.20), o ângulo δ se mantém constante em 0.7405 rad durante o pré-falta, de 0 a 5 segundos, em seguida ocorre a falta trifásica na linha de transmissão 2, fazendo com que o ângulo *delta* cresça até 1.8 rad, nesse instante a falta é eliminada. Nos primeiros instantes da eliminação da falta, o ângulo da máquina continua crescendo, até atingir 1.9 rad, logo em seguida o ângulo decresce rapidamente até estabilizar em 0.9631 rad. O desvio de velocidade ω , mostrado na Figura (5.21), permanece nula durante o pré-falta, em seguida, começa a crescer rapidamente no início da falta até atingir o valor de 2.463 rad/s, logo depois volta decrescer até o fim da falta, onde atinge um valor de 1.844 rad/s. No início pós-falta, o desvio de velocidade ω da máquina continua decrescendo, até atingir um mínimo de -1.007 rad/s, em seguida, a velocidade volta a crescer até estabilizar em zero.

Analisando o comportamento das variáveis δ e ω da máquina síncrona, percebe-se que o sistema analisado permaneceu estável mesmo após a perturbação causada pelo curto-circuito trifásico em uma das linhas de transmissão. Para enriquecer a análise, novas simulações são feitas repetidamente, onde o tempo de abertura dos disjuntores (t_a) é aumentado e as outras condições são mantidas. Com isso, outra simulação é feita para um tempo de abertura de 0.70 segundos ($t_a = 0.70$), onde as demais condições e a constante de compensação ($K_{SVC} = 0.15$) se mantêm as mesmas da simulação anterior. Os resultados obtidos para o sistema analisado nessas condições podem ser visualizados a partir das Figuras (5.22) e (5.23).

Com o sistema analisado utilizando $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.70s$, comportamento do ângulo δ e do desvio de velocidade ω da máquina síncrona é diferente da simulação anterior, onde $t_a = 0.40s$, isso pode ser visualizado nas Figuras (5.22) e (5.23). Percebe-se que o ângulo δ da Figura (5.22) permanece constante no pré-falta, mas diverge rapidamente nas situações de falta e pós-falta. O desvio de velocidade é nulo durante o pré-falta, com a falta, a velocidade começa a crescer até atingir o valor de 2.458 rad/s, em seguida ela volta a decrescer até eliminação da falta. No sistema pós-falta, o desvio de velocidade começa a oscilar entre os valores de pico de 14.68 rad/s e o de mínimo de 2.173 rad/s até o fim da simulação.

Verifica-se, através das figuras (5.22) e (5.23), que o ângulo δ da máquina diverge e o seu desvio de

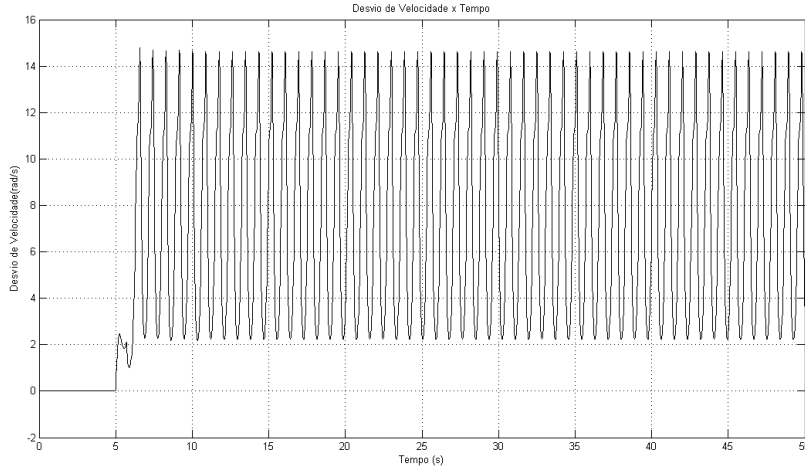


Figura 5.23: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.70s$ (modelo clássico com *FACTS* - SMBI).

velocidade ω começa a oscilar quando o sistema analisado possui um tempo de abertura $t_a = 0.70s$, sendo $K_{SVC} = 0.15$. Esse comportamento dessas variáveis indica que para esse caso, o sistema se torna instável após a falta. Sabendo que sistema é estável para $t_a = 0.55s$, e instável para $t_a = 0.70s$, uma série de simulações foram feitas variando os tempos de abertura no intervalo de 0.55 a 0.70 segundos. Isso foi feito com intuito de obter o tempo abertura dos disjuntores crítico (t_{cr}). O tempo de abertura crítico obtido foi de 0.644 segundos ($t_{cr} = 0.644s$), dessa forma, os tempos de abertura menores que 0.664s manterão o sistema estável, caso contrário, o sistema será instável.

Comparando os resultados obtidos na análise do sistema máquina *vs* barramento infinito, do modelo clássico sem *FACTS* em relação ao modelo clássico com *FACTS*, para uma compensação $K_{SVC} = 0.15$, é possível verificar uma diferença entre o comportamento dos dois casos. No caso do modelo clássico sem *FACTS*, o ângulo δ e a velocidade angular ω da máquina síncrona levam, aproximadamente, um intervalo de tempo de 20 segundos, após o início da falta, para convergir quando o sistema analisado estabiliza, além disso, o seu tempo de abertura crítico é de 0.258 segundos ($t_{cr} = 0.258s$). Já no caso do modelo clássico com *FACTS*, que utiliza um $K_{SVC} = 0.15$, o ângulo e o desvio de velocidade da máquina levam, aproximadamente, um intervalo de 5 segundos após o início da falta para convergir, sendo o sistema estável com o tempo de abertura crítico de 0.644 segundos ($t_{cr} = 0.664s$). A partir desses resultados, percebe-se que a implementação do controlador *FACTS* no sistema analisado influenciou no tempo de assentamento e na confiabilidade do controlador, fazendo com que o sistema estabilizasse mais rapidamente e aumentando o tempo de abertura crítico do sistema analisado.

O sistema analisado utilizando o controle por *FACTS*, com $K_{SVC} = 0.15$, possui o tempo de abertura crítico 2.57 vezes maior do que no caso sistema sem o dispositivo *FACTS*. Para cada valor da constante K_{SVC} de compensação do controlador *FACTS* existe um respectivo tempo de abertura crítico dos disjuntores. Quanto maior for K_{SVC} maior será o tempo de abertura crítico. Através de uma série de simulações, foram obtidos os tempos de abertura crítica para variados valores de K_{SVC} . Os gráficos do tempo abertura crítica dos disjuntores (t_{cr}) em relação ao nível de compensação (K_{SVC}) podem ser visualizados através

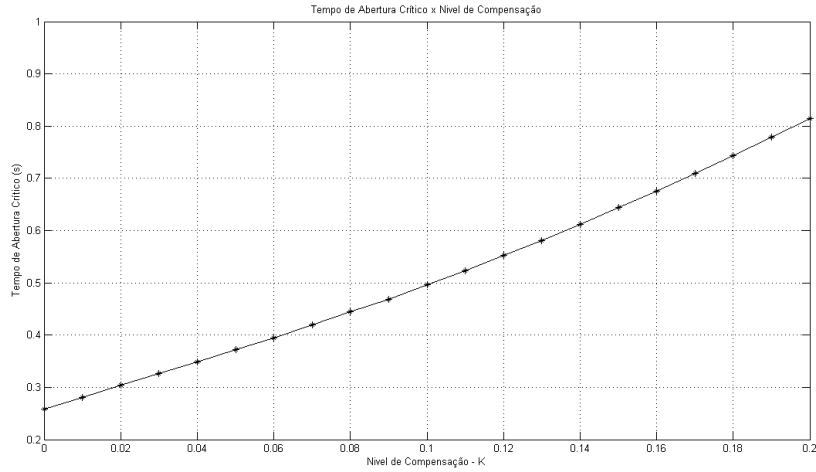


Figura 5.24: Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 a 0.20 (modelo clássico com *FACTS* - SMBI).

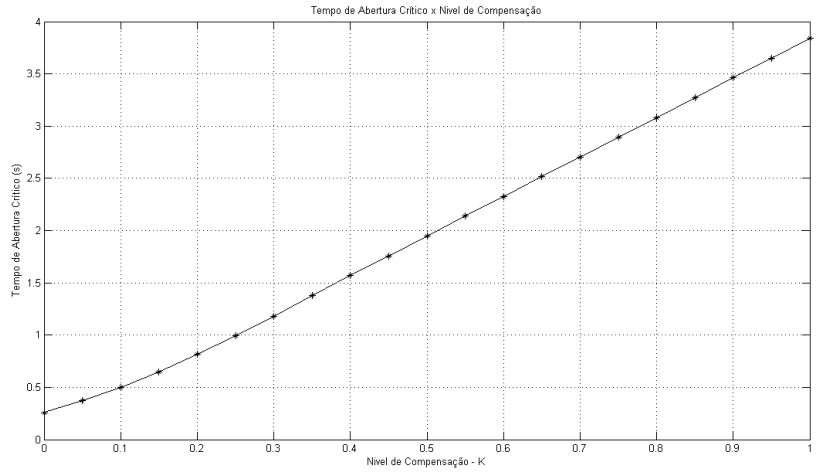


Figura 5.25: Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 a 1.00 (modelo clássico com *FACTS* - SMBI).

das Figuras (5.24) e (5.25).

A partir das Figuras (5.24) e (5.25), é possível perceber que o tempo abertura crítico varia de maneira linear em relação ao nível de compensação K_{SVC} . Para $K_{SVC} = 0.10$, o tempo abertura crítico é praticamente o dobro para o caso do sistema sem *FACTS*. Isso mostra, que até mesmo para pequenos níveis de compensação, a confiabilidade do sistema aumenta de maneira significativa com a presença dos controladores *FACTS*.

5.1.4 Modelo de Dois Eixos com *FACTS*

Assim como foi feita a análise do sistema máquina vs barramento infinito, com o dispositivo *FACTS* sendo implementado, utilizando o modelo clássico de máquina síncrona, foi feita de mesma forma para o modelo de dois eixos de máquina. A diferença entre esses dois modelos esta em seus conjuntos de equações

diferenciais, sendo que o modelo de dois eixos é de 4^o ordem e se baseia nas Equações de (4.17) á (4.20). Essas equações estão relacionadas ao ângulo δ , o desvio de velocidade ω e as tensões transitórias direta e de quadratura, E'_d e E'_q , respectivamente, onde deve-se destacar novamente a lei de controle u_{SVC} , que define o comportamento do compensador de reativos, sendo expresso pela Equação (4.14).

A estrutura do sistema analisado para o estudo da influência dos dispositivos da rede na sua confiabilidade é a mesma para os modelos clássico e de dois eixos, sendo os mesmos para as situações de pré-falta, em falta e pós-falta, como pode ser visualizado nas Figuras (5.17), (5.18) e (5.19), respectivamente. Contudo, diferentemente do modelo clássico, no modelo de dois eixos considera-se a variação das tensões direta e de quadratura da máquina, sendo necessário utilizar as reatâncias, x_d e x_q , e as reatâncias transitórias, x'_d e x'_q , para a resolução do sistema de equações diferenciais. Na modelagem do dispositivo *FACTS*, do tipo *SVC*, para o sistema nas condições impostas, utiliza-se inicialmente a constante de compensação de reativos do controlador K_{SVC} com o valor de 0.15.

Como no pré-falta o sistema se encontra em regime permanente, as condições iniciais do modelo de dois eixos, obtidos através de um fluxo de potência, são os independentes da presença ou não dos controladores *FACTS*. Com isso, as seguintes condições iniciais são utilizadas no pré-falta do sistema analisado.

- $\delta(0) = 1.085rad$
- $\omega(0) = 0$
- $E'_q(0) = 1.0958p.u$
- $E'_d(0) = -0.231p.u$

As condições iniciais das variáveis de estado do sistema se mantêm constates durante o pré-falta, que são os primeiros 5 segundos da simulação, pois nenhuma perturbação afeta o sistema nesse intervalo de tempo. Dessa forma, as condições iniciais do pré-falta se tornam as mesma do sistema em falta, que se inicia no instante seguinte aos 5 segundos, onde ocorre o curto-circuito trifásico no meio da linha de transmissão 2. A falta é eliminada do sistema com a retirada da linha de transmissão dois, que foi curto-circuitada, isso é feito com a abertura dos disjuntores da linha. Com isso, o tempo de simulação do sistema em falta é o mesmo do tempo de abertura dos disjuntores.

Da mesma forma que foi feita nas análises anteriores, a solução dos sistemas em falta e pós-falta é determinada a partir da utilização das suas condições iniciais, do calculo das reatâncias equivalente dos circuitos (5.18) e (5.19), e da resolução das equações diferenciais que modelam a máquina, que nesse caso são as Equações de (4.17) á (4.20), que definem o modelo de dois eixos com *FACTS*. Com isso, é possível simular o comportamento do sistema máquina *vs* barramento infinito sujeito a uma falta trifásico, e analisar a influência que o controlador *SVC* exerce sobre o sistema.

O comportamento do sistema no pós-falta permite determinar se ele permanece estável, ou então se desestabiliza e torna-se instável. O tempo de abertura dos disjuntores é um dos fatores de maior importância relacionado com a estabilidade do sistema. Para essa análise do sistema nas condições impostas, considera-se o tempo de abertura dos disjuntores de 0.65 segundos. Desta forma, foram obtidos resultados gráficos

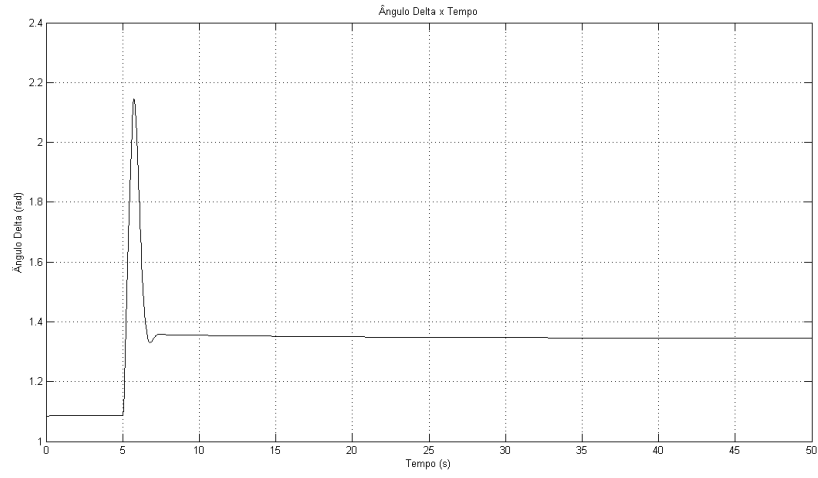


Figura 5.26: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

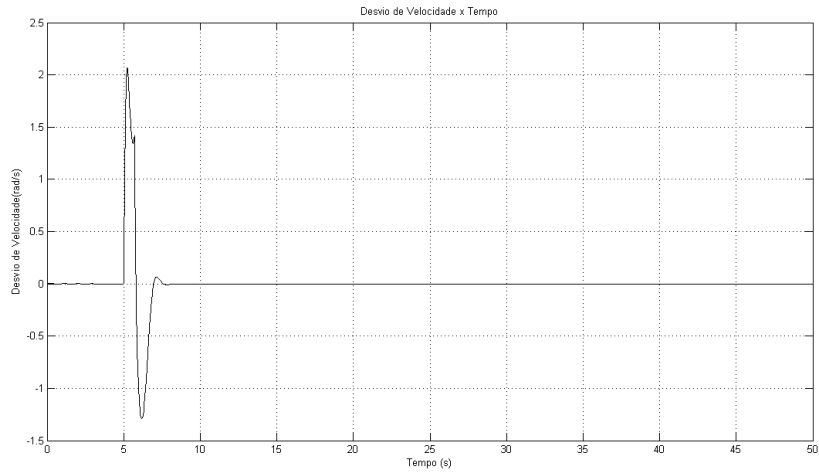


Figura 5.27: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

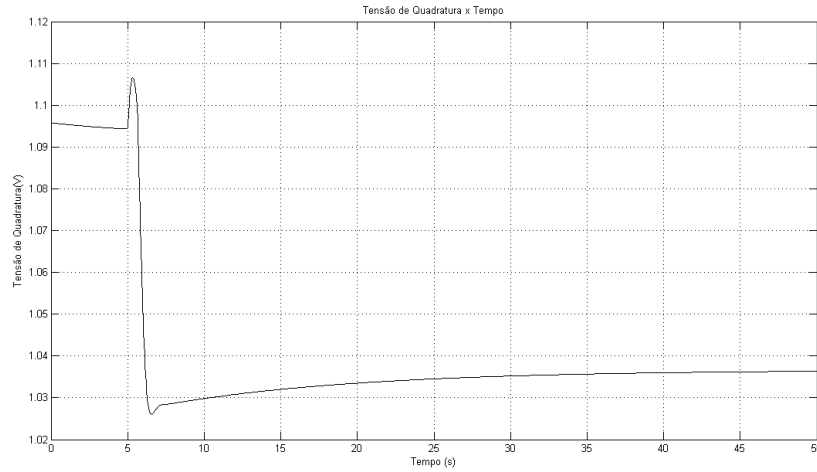


Figura 5.28: Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - *SMBI*).

através do *MatLab*, para as quatro variáveis do modelo de dois eixos de máquina síncrona. Esses gráficos podem ser visualizados nas Figuras (5.26), (5.27), (5.28) e (5.29).

A partir das Figuras (5.26), (5.27), que mostram os gráficos do ângulo δ e do desvio de velocidade ω do modelo de dois eixos em função do tempo, percebe-se uma semelhança do comportamento dessas variáveis nos dois modelos de máquina analisados para o sistema com *FACTS*, que utiliza $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$. Durante o pré-falta, o ângulo δ se mantém constante em 1.085 rad, com a falta trifásica no sistema, esse ângulo cresce durante o intervalo de falta até atingir o valor de 2.096 rad, em seguida, com a eliminação da falta, o ângulo da máquina continua crescendo até atingir 2.145 rad, mas logo em seguida decresce rapidamente até estabilizar no novo ponto de operação de 1.349 rad, como pode ser visto na Figura (5.26). Esse comportamento do ângulo δ no modelo de dois eixos é mesmo do modelo clássico, diferenciando-se apenas pela condição inicial e pelo ponto de operação no pós falta. Comparando as Figuras (5.21) e (5.27), verifica-se que o comportamento do desvio de velocidade ω para os dois modelos é o mesmo, tendo pequenas diferenças apenas nos pontos de mínimo e máximos, onde no modelo de dois eixos, o desvio de velocidade atinge um máximo de 2.068 rad/s e um mínimo de -1.32 rad/s, estabilizando em zero no final.

Além do ângulo δ e do desvio de velocidade ω , o modelo de dois eixos mostra o comportamento das tensões transitórias de quadratura e de eixo direto da máquina síncrona, podendo ser visualizados, respectivamente, nas Figuras (5.28) e (5.29). Analisando a Figura (5.28), percebe-se que no início da falta trifásica no sistema, a tensão de quadratura E_q cresce até atingir um pequeno pico de tensão de 1.107 p.u., voltando a decrescer em seguida, até o valor de 1.098 p.u., no final da falta. Após a eliminação da falta, a tensão do eixo de quadratura continua diminuindo por um pequeno intervalo de tempo, até atingir uma tensão mínima de 1.026 p.u., em seguida a tensão volta a crescer até convergir para o valor de 1,036 p.u. Já a tensão de eixo direto E_d , se possui um comportamento um pouco diferente da tensão de quadratura, pois no início da falta trifásica, a tensão aumenta até atingir o valor máximo de -0.1868 p.u., no final da falta, logo em seguida, com a eliminação da falta do sistema, a tensão decresce até convergir para o valor

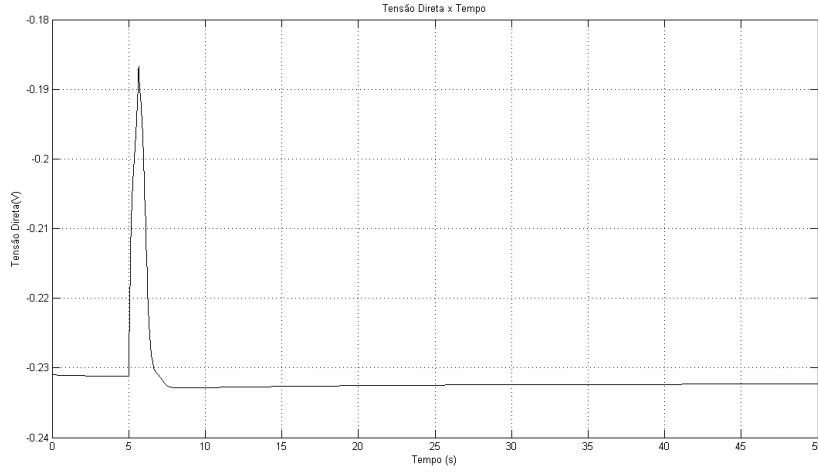


Figura 5.29: Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - *SMBI*).

de -0.2324 p.u., isso é mostrado na Figura (5.29).

A partir do comportamento citado das variáveis de estado do modelo de dois eixos, verifica-se que, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.65s$, o sistema analisado permanece estável após a falta trifásica na linha de transmissão. Simulando novamente o sistema analisado para um tempo de abertura dos disjuntores de 0.90 segundos ($t_a = 0.90s$), onde $K_{SVC} = 0.15$ e as demais condições do sistema se mantêm, percebe-se um comportamento diferente das variáveis do modelo de dois eixos. Esse comportamento das variáveis, para $t_a = 0.90s$ e $K_{SVC} = 0.15$, pode ser analisados a partir dos gráficos mostrados nas Figuras (5.30), (5.31), (5.32) e (5.33).

A Figura (5.30) mostra o ângulo δ da máquina divergindo após o início da falta no sistema, enquanto a Figura (5.31) mostra o desvio de velocidade da máquina aumentando com o início da falta até começar a oscilar entre os valores de 15.79 e 7.113 rad/s no pós-falta do sistema. As Figuras (5.32) e (5.33) mostram o comportamento das tensões transitórias de quadratura e de eixo direto, respectivamente. A tensão de quadratura cresce rapidamente no início da falta, até atingir 1.106 p.u., e em seguida começa a decrescer até começar a oscilar entre os valores de 0.8494 e 0.817 p.u. no pós-falta. Já a tensão de eixo direto, cresce rapidamente no início da falta, no pós-falta a tensão oscila entre os valores de 0.05717 e -0.06027 p.u.

Analisando o comportamento das quatro variáveis de estado do modelo, percebe-se que o ângulo δ diverge no pós-falta, enquanto as demais variáveis oscilam entre um determinado intervalo. Esses tipos de características no comportamento das variáveis indicam que o sistema elétrico é instável para $t_a = 0.90s$ e $K_{SVC} = 0.15$. Como o sistema analisado é estável para $t_a = 0.65s$, e instável para $t_a = 0.90s$, sabe-se que o tempo de abertura crítico dos disjuntores (t_{cr}) encontra-se entre no intervalos entre esses dois tempos. Com isso, através de simulações variando o tempo de abertura, foi obtido o tempo de abertura crítico de 0.790 segundos ($t_{cr} = 0.790s$) para o modelo de dois eixos com *FACTS*. Dessa forma, o sistema será instável caso o tempo de abertura dos disjuntores seja maior do que 0.790 segundos, sendo menor que isso, o sistema se manterá estável.

A partir de uma comparação entre os resultados das variáveis de estado, do modelo de máquina de

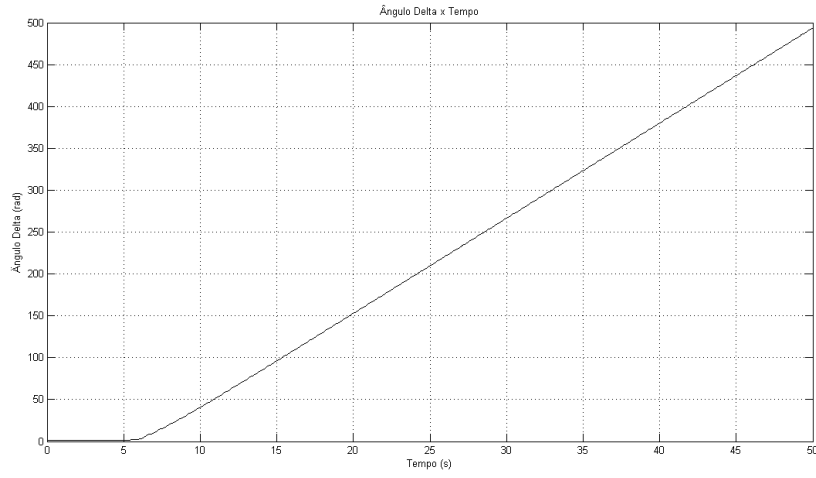


Figura 5.30: Gráfico do ângulo da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

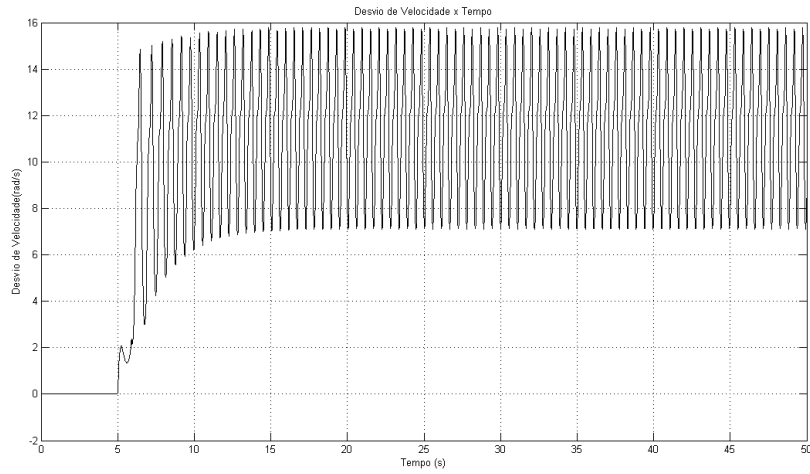


Figura 5.31: Gráfico do desvio de velocidade da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

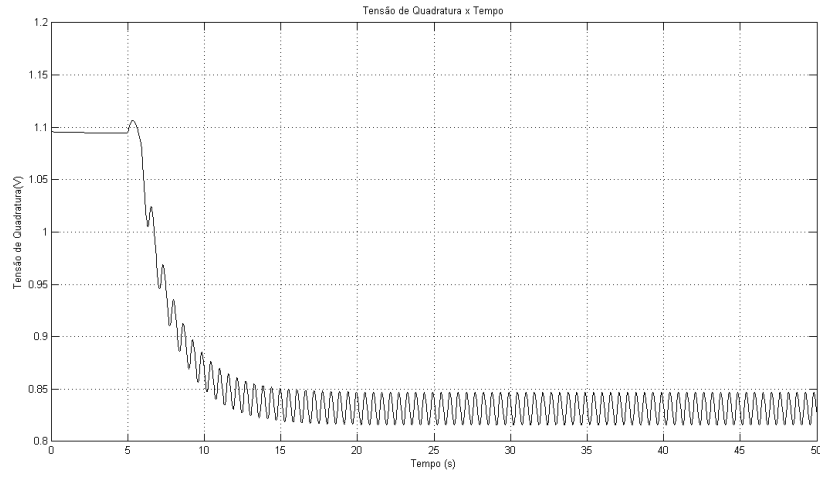


Figura 5.32: Gráfico da tensão transitória de quadratura da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

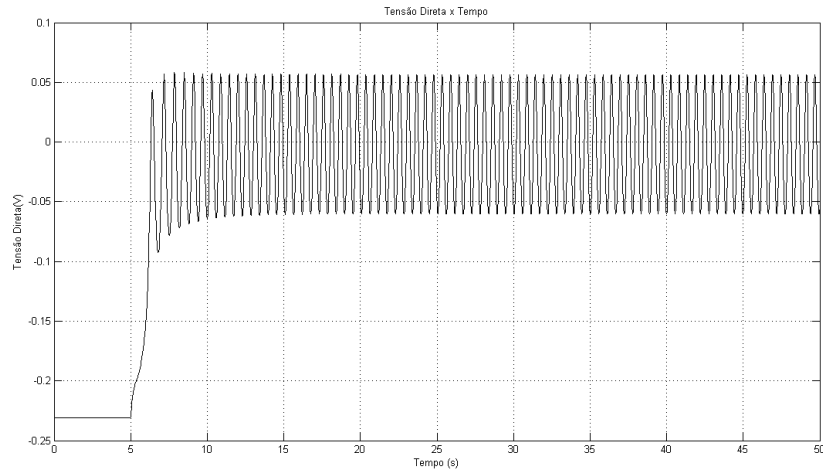


Figura 5.33: Gráfico da tensão transitória direta da máquina em relação ao tempo, para $K_{SVC} = 0.15$ e $t_a = 0.90s$ (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

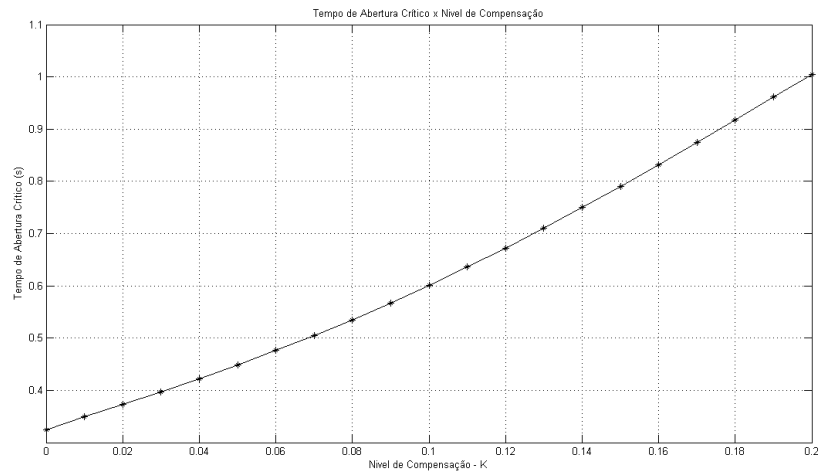


Figura 5.34: Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 á 0.20 (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

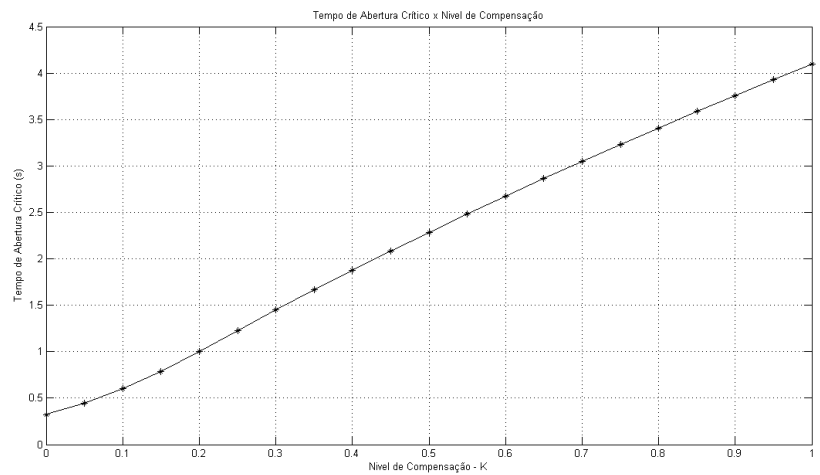


Figura 5.35: Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 á 1.00 (modelo de dois eixos com *FACTS* - SMBI).

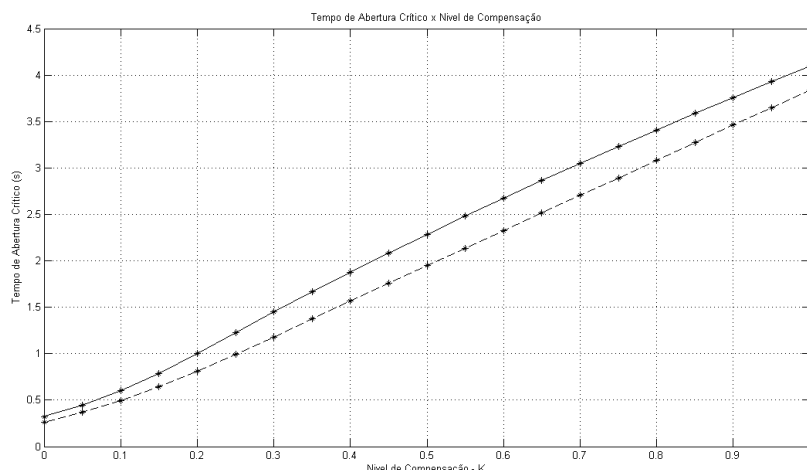


Figura 5.36: Gráfico t_{cr} vs K_{SVC} , para K_{SVC} de 0 a 1.00 (os dois de máquinas síncronas com *FACTS* - *SMBI*).

dois eixos, para os casos sem e com a presença do controlador *SVC* no sistema máquina *vs* barramento infinito, percebe-se a influência que o dispositivo *FACTS* realiza na estabilidade do sistema analisado. Nos casos estáveis, verifica-se que no sistema com *FACTS*, o tempo de assentamento das variáveis de estado são reduzidos para, aproximadamente, 2 segundos, pois no sistema sem *FACTS*, o tempo assentamento das variáveis da máquina é de, aproximadamente, 20 segundos. Outro fator de grande importância relacionado ao controlador *FACTS*, é o aumento do tempo de abertura crítica dos disjuntores, que passou de 0.324 segundos no caso do sistema sem *FACTS*, para 0.790 segundos no caso sistema com *FACTS* para $K_{SVC} = 0.15$. Desta forma, é possível perceber a melhora que o controle por *FACTS* realiza na funcionalidade e na confiabilidade do sistema elétrico de potência.

As simulações realizadas para do sistema analisado com o modelo de dois eixos e a presença de *FACTS*, utilizou a constante de compensação K_{SVC} com o valor de 0.15. Variando a constante K_{SVC} a confiabilidade do sistema se altera, pois o tempo de abertura crítica dos disjuntores esta diretamente relacionado com a constante K_{SVC} . Com isso, uma série de simulações foram realizadas variando o valor da constante K_{SVC} , com intuito de obter o tempos de abertura crítica para cada valor de K_{SVC} . Desta forma, foi obtido o gráfico do tempo de abertura crítica dos disjuntores (t_{cr}) em função da constante de compensação K_{SVC} , que é mostrado nas Figuras (5.34) e (5.35).

As Figuras (5.34) e (5.35) mostram que o tempo de abertura crítica varia de maneira quase linear com o nível de compensação K_{SVC} . Com isso, é possível perceber a importância dos dispositivos *FACTS* no aumento da confiabilidade do sistema. Comparando os gráficos do tempo de abertura crítica em relação ao nível de compensação dos dois modelos de máquina síncronas analisados, percebe-se que os tempos de abertura crítica do modelo de dois eixos são sempre maiores do que as do modelo clássico, isso pode ser visualizado na Figura (5.36).

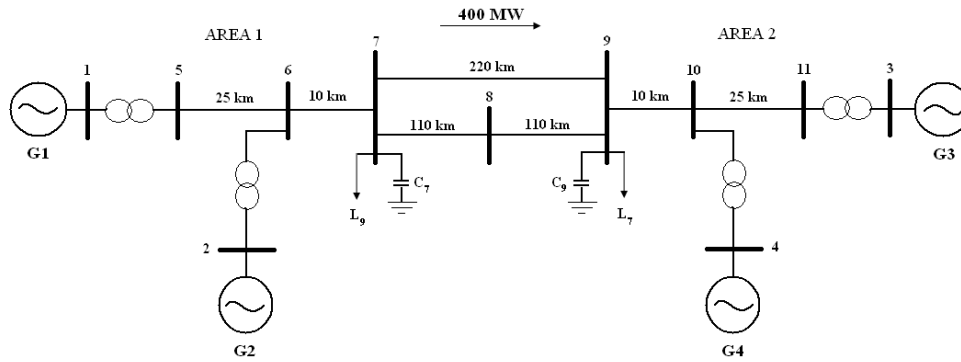


Figura 5.37: Esquema elétrico unifilar do sistema de duas áreas de Prabah Kundur.

5.2 Sistema Preservando a Estrutura da Rede

Para um estudo mais adequado da estabilidade transitória de sistemas potência é necessário realizar análises de estruturas elétricas mais complexas. Essa complexidade vai depender do número de geradores, barramentos e cargas que compõem o sistema. O sistema que considera a influência de cada um dos componentes em sua estabilidade é o denominado sistema preservando a estrutura da rede. A análise desse tipo de sistema não reduz as impedâncias da rede até encontrar uma impedância equivalente, em vez disso, o comportamento de cada um dos barramentos da rede são analisados. Isso é feito intuito de verificar a influência que os geradores e as cargas, ligadas aos barramentos, causam na estabilidade do sistema.

Neste trabalho, a simulação do sistema preservando a estrutura da rede é realizada para o sistema de duas áreas de Prabah Kundur, mostrado na Figura (5.37). Esse sistema possui uma estrutura mais complexa, composta por quatro geradores síncronos, quatro transformadores, duas cargas, sendo utilizados onze barramentos e sete linhas de transmissão. O sistema de duas áreas de Kundur se caracteriza por possuir duas áreas com estruturas elétricas idênticas, sendo ligadas por duas linhas de transmissão com uma extensão de 220 km. Nessas linhas, existe um fluxo de potência de 400 MVA indo da área 1 para a área 2, isso indica que, mesmo com as duas áreas possuindo uma estrutura elétrica idêntica, as propriedades e características dos geradores síncronos são distintas umas das outras [17].

A Figura (5.37) mostra que cada uma das áreas possui dois geradores, dois transformadores, uma carga, cinco barramentos e duas linhas de transmissão, uma de 25 km e outra de 10 km. Mesmo sendo áreas iguais, o fluxo de potência ocorre devido a diferença entre as tensões e os ângulos das máquinas síncronas do sistema. Com isso, cada uma das máquinas síncrona gera potências ativa e reativa distintas, entretanto, a maioria dos parâmetros dos quatro geradores são os mesmos [17, 2].

Considerando a potência base de 900 MVA e a tensão base de 20 kV, sendo a frequência fundamental do sistema de 60 Hz, as propriedades e os parâmetros dos quatro geradores síncronos são mostrados logo abaixo:

- Reatâncias: $X_d = 1.8$ p.u, $X_q = 1.7$ p.u, $X_l = 0.2$ p.u
- Reatâncias transitórias: $X'_d = 0.3$ p.u, $X'_q = 0.55$ p.u

- Reatâncias subtransitórias: $X_d'' = 0.25$ p.u, $X_q'' = 0.25$ p.u
- Resistência: $R_a = 0.0025$ p.u
- Constante de inércia das máquinas: $H_1 = H_2 = 6.5$ s, $H_3 = H_4 = 6.175$ s
- Constantes de tempo: $T_d' = 8$ s, $T_q' = 0.4$ s, $T_d'' = 0.03$ s, $T_q'' = 0.05$ s
- Constante de amortecimento: $K_D = 0$
- Modos: $A_{sat} = 0.015$, $B_{sat} = 9.6$
- Fluxo de corrente: $\phi_{TI} = 0.9$ p.u

Levando em conta a base de potência de 900 MVA, e de tensão de 20/230 kV para os transfos, a impedância dos quatro transformadores, em p.u, é de $Z_T = 0 + j0.15$. Para as linhas de transmissão, considerando a base de 100 MVA e 230 Kv, os parâmetros são os seguintes:

- Resistência: $r = 0.0001$ p.u/km
- Reatâncias: $x = 0.001$ p.u/km
- Susceptância: $b_C = 0.00175$ p.u/km

O sistema de Kundur, em operação, realiza a transmissão de 400 MW da área 1 para a área 2. Para isso, os quatro geradores síncronos, localizados nas barras 1, 2, 3 e 4 do sistema, utilizam os seguintes dados de geração:

- G1: $P = 700$ MW $Q = 185$ MVar $E_t = 1.03 \angle 20.2^\circ$ kV
- G2: $P = 700$ MW $Q = 235$ MVar $E_t = 1.01 \angle 10.5^\circ$ kV
- G3: $P = 719$ MW $Q = 176$ MVar $E_t = 1.03 \angle -6.8^\circ$ kV
- G4: $P = 700$ MW $Q = 202$ MVar $E_t = 1.01 \angle -17^\circ$ kV

As duas cargas são localizadas nos barramentos 7 e 9 do sistema, possuindo os seguintes dados de potência consumida:

- L_7 : $P_L = 967$ MW $Q_L = 100$ MVar $Q_C = 200$ MVar
- L_9 : $P_L = 1767$ MW $Q_L = 100$ MVar $Q_C = 350$ MVar

A partir desses dados é possível simular o seu comportamento do sistema de duas áreas de Kundur, e dessa forma, analisar suas principais variáveis. Nas simulações do sistema de duas áreas de Kundur, o foco está em analisar a influência que um controlador SVC realiza nas características e no comportamento do sistema. Com isso, a análise do sistema é feita para uma situação sem o controlador SVC e uma situação

com o controlador *SVC*. Desta maneira, verifica-se a importância dos dispositivos *FACTS* e de outros fatores para a confiabilidade do sistema analisado.[2, 17]

Nas análises dos sistemas de duas áreas de Kundur, considera-se a implementação dos sistemas de excitação para cada um dos quatro geradores síncronos ligados a rede. Esses sistemas de excitação são utilizados para regular o comportamento das máquinas síncronas com intuito de sempre mante-los no melhor ponto de operação possível, com isso, a confiabilidade do sistema é aumentada. Os principais componentes desse sistema de excitação são o regulador de tensão, o regulador de velocidade e o *PSS*, onde cada componente regula uma determinada variável de grande importância para a operação do sistema analisado.

Devido ao alto nível de complexidade do sistema de duas áreas de Kundur, as rotinas mais simples foram deixadas de lado, sendo utilizado outra ferramenta do *MatLab* para a realização das simulações. Essa ferramenta é o *Simulink*, que utiliza diagramas de blocos para a realizar a solução dos problemas. Dentro do *Simulink* existe uma área mais específica para a simulação de sistemas de elétricos potência, que é o *SimPowerSystem*. No *SimPowerSystem* são utilizados blocos que caracterizam os principais componentes do sistema elétrico, sendo possível montar o esquema elétrico do sistema analisado. Com isso, a análise do sistema de duas áreas de Kundur, sem e com o controle por *FACTS*, é realizada de maneira simples e fácil.

5.2.1 Sistema de Duas Áreas de Kundur sem o controlador *SVC*

A simulação do sistema de duas áreas de Kundur tem como intuito realizar a análise de estabilidade do sistema, verificando o comportamento dos quatro geradores síncronos, através dos ângulos e dos desvios de velocidades das máquinas. Além disso, também é realizada uma análise nos dois barramentos que ligam as duas áreas estudadas através de duas linhas de transmissão. Essa análise leva em conta o comportamento das tensões terminais dos barramentos e o fluxo de potência entre eles, quando o sistema é sujeito a uma grande perturbação. O primeiro caso simulado, leva em conta uma falta trifásica no meio da linha de transmissão 1, o funcionamento do sistema de excitação e do *PSS* e a ausência do controlador *SVC*. A Figura (5.38) mostra o diagrama trifilar do sistema de duas áreas de Kundur elaborado para a simulação no *SimPowerSystem*.

O diagrama trifilar da Figura (5.38) mostra os blocos das linhas de transmissão, dos barramentos de ligação, dos dois disjuntores de abertura e da falta trifásica, enquanto os outros componentes do sistema estão incluídos nos blocos área 1 e área 2. Os demais blocos mostrados na Figura (5.38) são responsáveis pelas medições das variáveis de interesse. O diagrama trifilar das áreas 1 e 2, montados no *SimPowerSystem*, são mostradas nas Figuras (5.39) e (5.40), respectivamente, onde é possível perceber a semelhança entre as estruturas elétricas.

A partir das Figuras (5.39) e (5.40), verifica-se que em cada uma das áreas existem os blocos de dois geradores síncronos, dois transformadores, duas linhas de transmissão e uma carga ligada ao barramento de ligação. Além desses componentes, deve-se destacar a existência um sistema de excitação para cada um dos geradores síncronos. Esses sistemas de excitação são compostos por reguladores de tensão e reguladores de velocidade que são conectados ao *PSS*, tendo o objetivo de evitar a perda de sincronismo entre as máquinas, aumentando assim a confiabilidade do sistema. O diagrama do sistema de excitação das

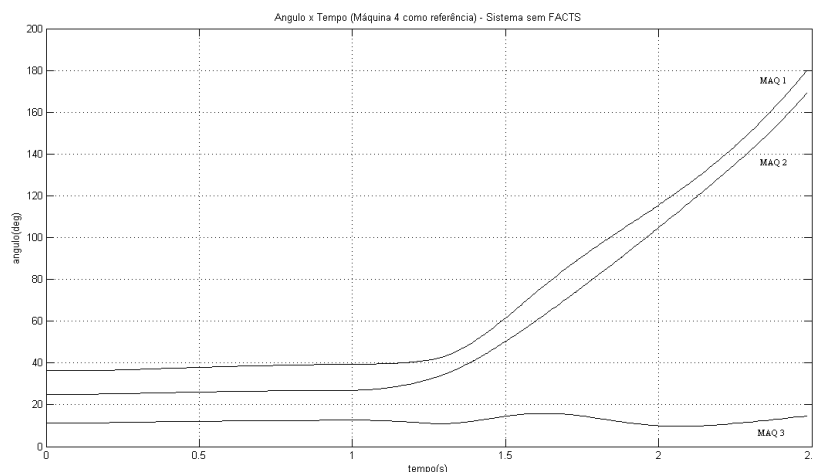


Figura 5.41: Gráfico dos ângulos das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem *FACTS*.

máquinas é pode ser visualizado no anexo desse trabalho.

O sistema é simulado com um tempo de pré-falta de 1 segundo, um tempo de abertura dos disjuntores de 0.25 segundos, sendo o tempo de simulação de 10 segundos. Com a simulação, são medidos os ângulos e os desvios de velocidades dos quatro geradores síncronos, também é medido o fluxo de potência e a tensão entre os barramentos de ligação entre áreas 1 e 2. Dessa maneira, é possível observar o comportamento transitório dessas variáveis para as condições impostas para o sistema sem o controlador *SVC*. Os resultados obtidos nessa simulação são mostrados nas Figuras (5.41), (5.42), (5.43) e (5.44).

Os ângulos das máquinas síncronas do sistema, nessa simulação, podem ser visualizados na Figura (5.41), sendo o ângulo da máquina 4 uma referência para as demais. É possível perceber por essa figura, que no instante da falta, após 1 segundo de simulação, os ângulos das máquinas 1 e 2 começaram a se comportar de maneira distinta do da máquina 3. Durante a falta, os ângulos das máquinas 1 e 2 crescem enquanto o ângulo da máquina 3 se mantém praticamente constante. Após a eliminação da falta, os ângulos das máquinas 1 e 2 crescem rapidamente até divergirem, já o ângulo da máquina 3 se mantém o mesmo, isso caracteriza a perda de sincronismo entre as máquinas do sistema. Com a perda de sincronismo, a simulação do sistema é parada, pois as variáveis ficam fora da região de operação.

A Figura (5.42), mostra o comportamento dos desvios de velocidades das máquinas dessa simulação. Percebe-se pela figura, que os desvios de velocidades das quatro máquinas se comportam de maneira semelhante, do pré-falta até a eliminação da falta. Entretanto, no início do pós-falta, as velocidades angulares das máquinas 1 e 2 começam a crescer mais rapidamente do que os das máquinas 3 e 4, sendo que perto do 2.5 segundos, a simulação do sistema é encerrada devido a perda de sincronismo entre as máquinas síncronas.

Analisando os barramentos de ligação entre as duas áreas, percebe-se, pela Figura (5.43), que no pré-falta as tensões dos barramentos permanecem praticamente constantes. No instante da falta, as tensões caem bruscamente para aproximadamente 0.775 p.u, e em seguida, crescem rapidamente até atingirem seus valores máximos, entre 1.187 e 1.211 p.u, no instante em que a falta é eliminada do sistema. Logo no

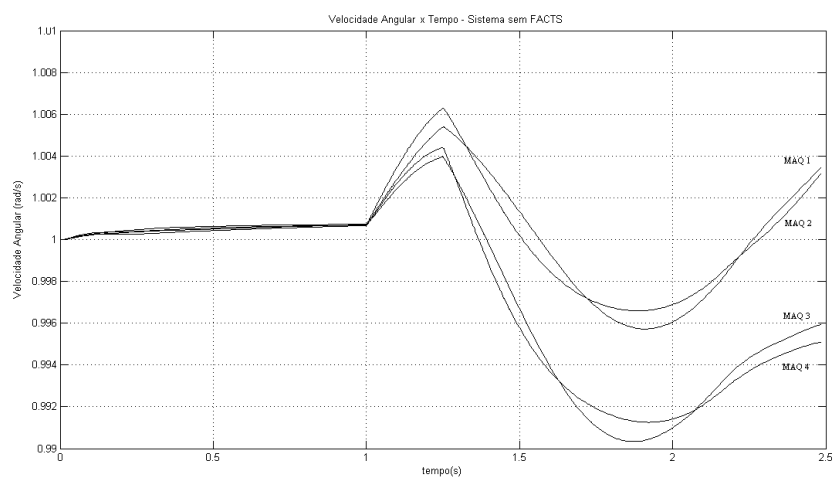


Figura 5.42: Gráfico dos desvios de velocidades das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem *FACTS*.

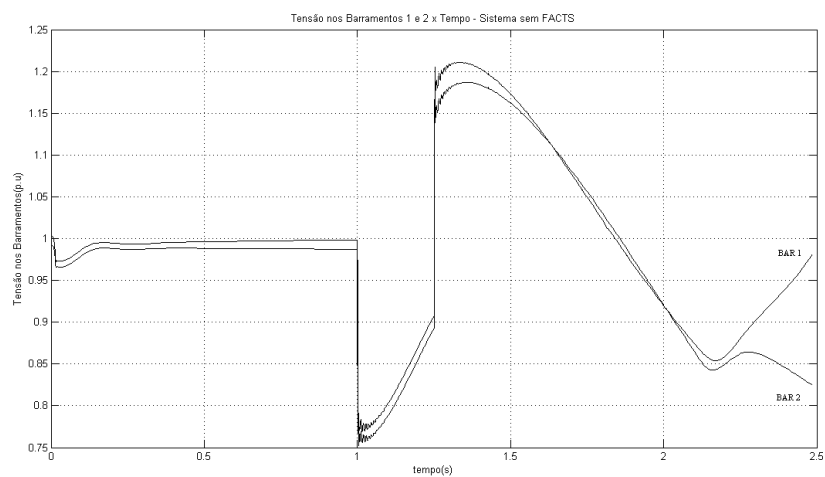


Figura 5.43: Gráfico das tensões nos barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem *FACTS*.

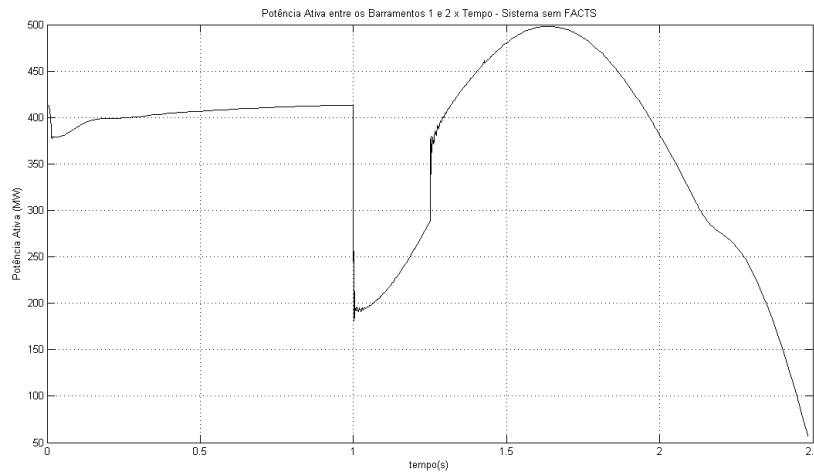


Figura 5.44: Gráfico do fluxo de potência entre os barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur sem *FACTS*.

início do pós-falta, os valores das tensões decrescem até aproximadamente 0.85 p.u. Em seguida a tensão do barramento 1 começa a crescer, enquanto a tensão no barramento 2 tem um leve crescimento seguido de uma nova queda. Após essa queda de tensão no barramento 2 e a diferença entre as tensões dos dois barramentos fizeram com que a simulação do sistema fosse interrompida próximo aos 2.5 segundos.

O comportamento do fluxo de potência entre os barramentos 1 e 2, mostrado na Figura (5.44), é semelhante ao das tensões nos barramentos durante a pré-falta e a falta do sistema, onde é possível perceber que os pontos de queda e de crescimento do fluxo de potência são os mesmos dos das tensões nos barramentos. Contudo, no início do pós-falta, o fluxo de potência na rede cresce até atingir o valor máximo de 498.3 MW, em seguida o fluxo de potência diminui significativamente, encerrando a simulação do sistema.

O comportamento das variáveis analisadas no sistema duas áreas de Kundur sem *FACTS*, para as condições consideradas, indicam que o sistema é instável após o curto-circuito trifásico na linha de transmissão 1. Isso ocorre pelo fato das variáveis analisadas não estarem na região que permitam a operação do sistema. Para as condições impostas, percebe-se que mesmo variando o tempo de abertura dos disjuntores, o sistema de excitação das máquinas síncronas não foram o suficiente para manter o sistema analisado nas condições estáveis. Levando isso em conta, um segundo caso de simulação é realizado, considerando as condições do primeiro caso, sendo adicionado um controle por *FACTS* no sistema.

5.2.2 Sistema de Duas Áreas de Kundur com controlador SVC

Para segundo caso de simulação do sistema de duas áreas de Kundur considera-se uma falta trifásica no meio da linha de transmissão 1, no meio da linha de transmissão 2 é instalado um controlador *FACTS*, do tipo *SVC*, e para cada máquina síncrona existe um sistema de excitação. Essa simulação tem o objetivo de analisar a estabilidade do sistema através do comportamento das quatro máquinas síncronas, além do fluxo de potência e das tensões nos barramentos de ligação das duas áreas. Outro fator de grande importância para essa análise, é o comportamento do dispositivo *SVC*, que utiliza uma susceptância variável para

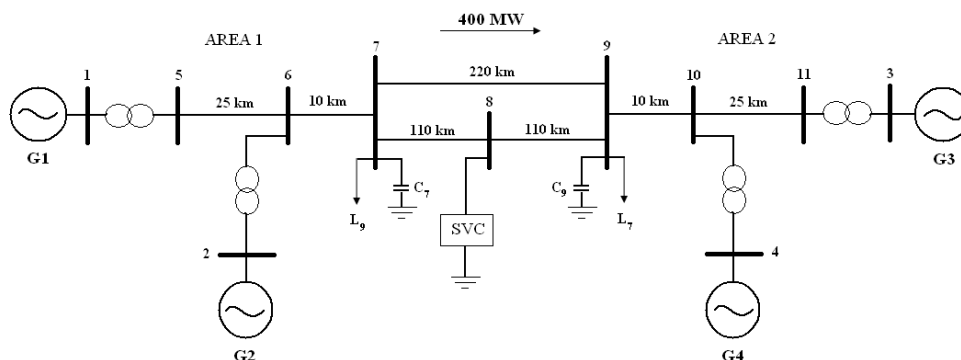


Figura 5.45: Esquema elétrico unifilar do sistema de duas áreas de Prabrah Kundur com SVC no *SimPowerSystem*.

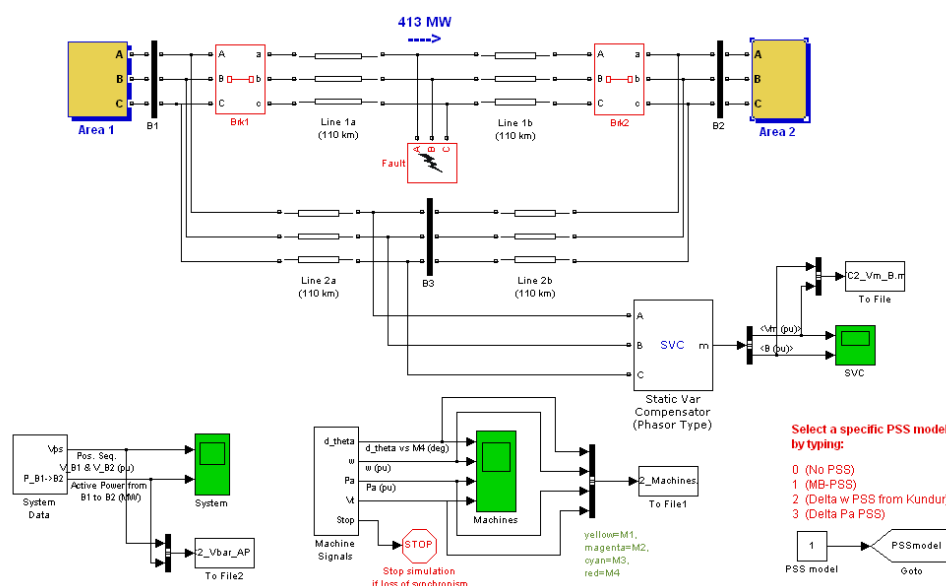


Figura 5.46: Diagrama trifilar do sistema de duas áreas de Prabrah Kundur com SVC no *SimPowerSystem*.

controlar o fluxo de potência na rede emanar as grandezas do sistema em pontos de operação. A Figura (5.45) mostra o esquema elétrico unifilar do sistema de duas áreas de Kundur com o controlador SVC, enquanto a Figura (5.46) mostra o diagrama trifásico do sistema analisado desenvolvido para a simulação no *SimPowerSystem*.

Assim como no diagrama da Figura (5.38), o diagrama trifilar do sistema de duas áreas de Kundur, para o segundo caso de simulação, utiliza os mesmos componentes para construção do sistema no *SimPowerSystem*. Entretanto, um bloco que representa um controlador *FACTS*, do tipo SVC, é implementado no sistema analisado, como mostrado na Figura (5.46). As configurações das áreas 1 e área 2, além de todo o sistema de excitação, são os mesmos tanto no primeiro caso quanto no segundo caso de simulação, sendo mostrados nas Figuras (5.39), (5.40) e no anexo do trabalho, respectivamente.

A simulação do segundo caso do sistema analisado, utiliza as mesmas condições que no primeiro caso, um tempo de pré-falta de 1 segundo, um tempo de abertura dos disjuntores de 0.25 segundos, sendo o tempo

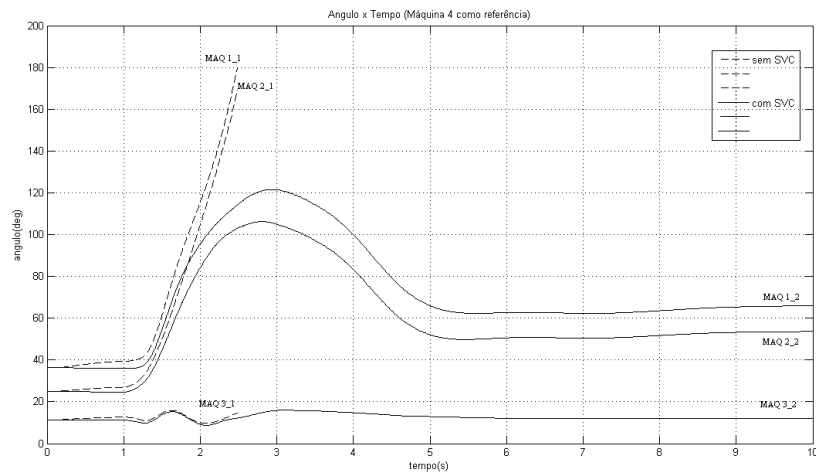


Figura 5.47: Gráfico dos ângulos das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com *FACTS*.

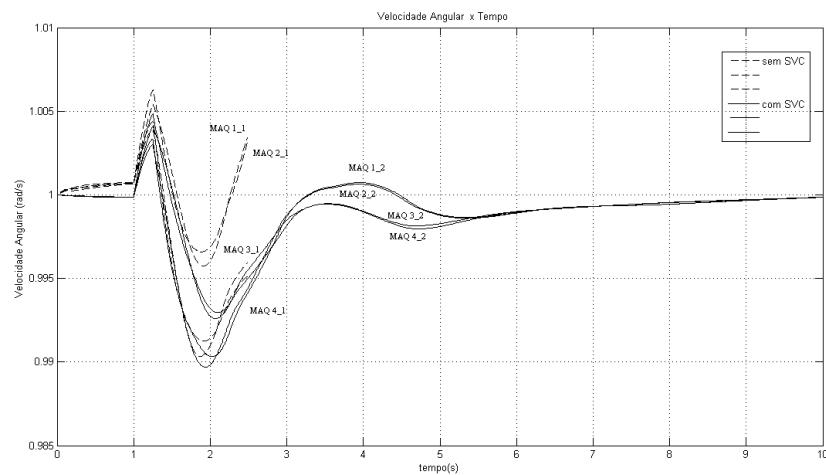


Figura 5.48: Gráfico dos desvios de velocidades das máquinas em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com *FACTS*.

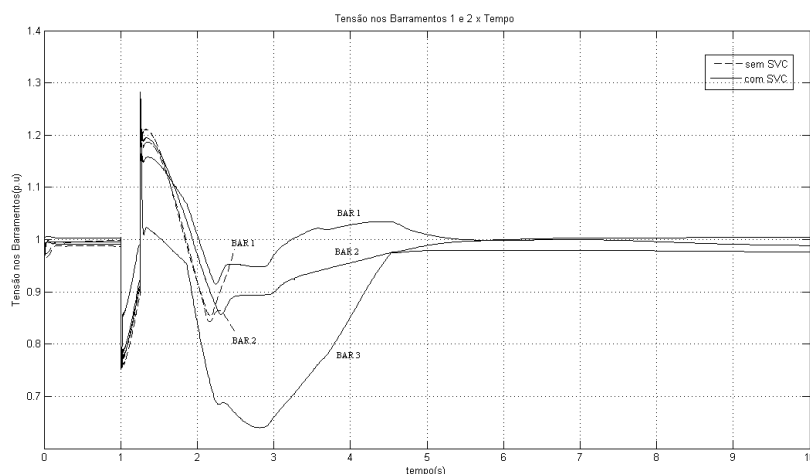


Figura 5.49: Gráfico das tensões nos barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com *FACTS*.

de simulação de 10 segundos. Entretanto, para o segundo caso, além das medições dos mesmos tipos de variáveis do primeiro caso, também é realizada a medida da susceptância variável do controlador *SVC*. Através do comportamento da susceptância do *SVC*, é possível perceber a influência que o controlador causa na rede de transmissão. Os resultados obtidos para o segundo caso de simulação do sistema são colocados juntos dos resultados do primeiro caso, com intuito de comparar as soluções e visualizar a influência que o controlador *FACTS* realiza no sistema analisado. Esses resultados podem ser visualizados nas Figuras (5.47), (5.48), (5.49) e (5.50), sendo que, as curvas tracejadas representam o sistema analisado sem o controle por *FACTS*, enquanto as curvas contínuas representam o sistema com o controle por *FACTS*.

A comparação dos comportamentos dos ângulos das máquinas síncronas do primeiro e segundo caso do sistema analisado podem ser visualizados através da Figura (5.47), sendo o ângulo da máquina 4 uma referência para as demais. Percebe-se por essa figura, que nos intervalos de tempo de pré-falta e de falta, o comportamento dos ângulos nos dois casos são muito semelhantes, sendo os ângulos do primeiro caso ligeiramente maiores do que do segundo caso. Entretanto, após a eliminação da falta, as máquinas 1 e 2 do segundo caso aceleram um pouco antes de estabilizar e manter o sincronismo com a máquina 3, enquanto no primeiro caso, as máquinas 1 e 2 disparam e perdem o sincronismo com a máquina 3, tirando o sistema de operação.

Assim como foi feita a comparação do comportamento do ângulo das máquinas do primeiro e do segundo caso, o mesmo é feito com os desvios de velocidade das máquinas síncronas, podendo ser visualizado na Figura (5.48). No segundo caso, os desvios de velocidade das quatro máquinas permaneceram próximos durante boa parte da simulação, variando um pouco durante a falta, sendo o mesmo comportamento das máquinas no primeiro caso. Já no pós-falta, o desvio de velocidade do primeiro caso das máquinas 1 e 2 crescem mais rápido do que das máquinas 3 e 4, caracterizando a perda de sincronismo e o fim da operação do sistema, enquanto no segundo caso, as quatro máquinas do sistema convergem para o mesmo ponto.

A Figura (5.49) mostra a comparação do comportamento dos dois casos analisados das tensões dos bar-

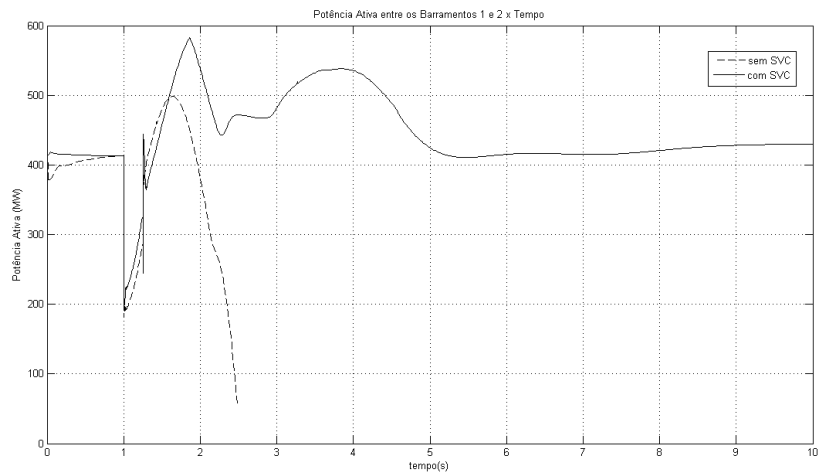


Figura 5.50: Gráfico do fluxo de potência entre os barramentos de ligação em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com *FACTS*.

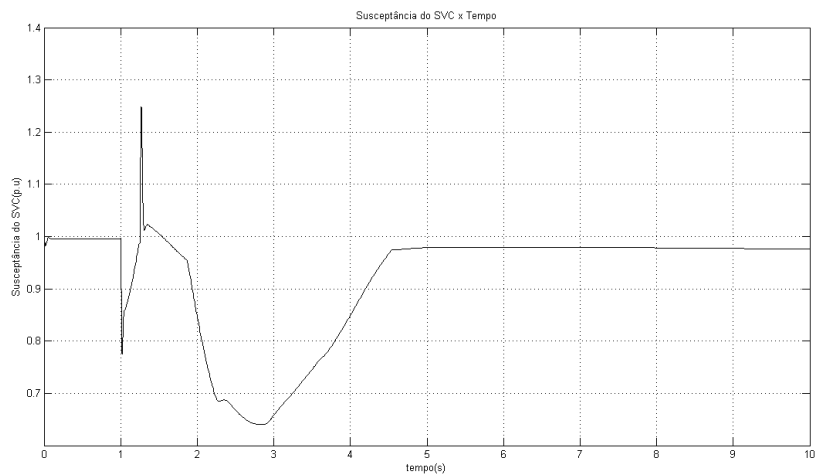


Figura 5.51: Gráfico da susceptância variável do controlador SVC em relação ao tempo, para o sistema de duas áreas de Kundur com *FACTS*.

ramentos de ligação da área 1 com a área 2. No segundo caso são analisados as tensões em três barramentos, sendo dois ligados as áreas do sistema e um ligado ao controlador SVC, como mostrado no esquema da Figura (5.46). O comportamento das tensões nos barramentos do segundo caso é semelhante ao primeiro caso durante os intervalos de pré-falta e de falta, onde a diferença está no fato do nível de tensão do primeiro caso estar um pouco abaixo do segundo caso. Contudo, no pós-falta, a tensão no barramento 2 do primeiro caso diminui para um nível fora de operação, encerrando a simulação, enquanto no segundo caso, as tensões nos barramentos 1, 2 e 3 convergem para novos pontos de operação do sistema.

Os dois casos simulados do fluxo de potência entre os barramentos de ligação das duas áreas do sistema analisado são mostrados na Figura (5.50). O fluxo de potências nos dois casos é semelhante no pré-falta e na falta, levando em conta que no primeiro caso, o fluxo de potência é menor no pré-falta e atinge um valor maior durante a falta. No instante em que a falta é eliminada, percebe-se que o fluxo de potência do primeiro caso é menor do que no segundo caso, isso continua nos instantes seguintes, até o fluxo de potência do primeiro caso decrescer rapidamente, encerrando a operação do sistema e a simulação, enquanto no segundo caso simulado, o fluxo de potência convergiu para outro ponto de operação.

A análise da susceptância variável do controlador SVC é realizada apenas no segundo caso simulado, onde o dispositivo *FACTS* é conectado no meio de uma das linhas de interligação do sistema de duas áreas de Kundur. A Figura (5.51), mostra o comportamento da susceptância variável do SVC em função do tempo. Percebe-se que no pré-falta, a susceptância é praticamente constante, no início da falta ela afunda, nos instantes seguintes a susceptância começa a crescer até atingir um valor máximo de 1.248 p.u no instante da eliminação da falta. No início do pós-falta, a susceptância do controlador SVC volta a decrescer rapidamente, instantes depois, ela volta a crescer, de maneira mais suave até convergir para um novo ponto de operação. Deve-se destacar a semelhança da curva de susceptância com as curvas das tensões nos barramentos do segundo caso, mostrados nas Figuras (5.51) e (5.49), respectivamente, onde é possível perceber, através dos valores máximos e mínimos das curvas, o controle da tensão que o dispositivo *FACTS* realiza através da variação de sua susceptância.

As variáveis do segundo caso simulado do sistema de duas áreas de Kundur apresentaram um comportamento distinto do primeiro caso. Enquanto no primeiro caso as variáveis divergiam se saíam da região de operação, caracterizando a instabilidade do sistema, no segundo caso todas as variáveis analisadas convergiram para um novo ponto de operação após a eliminação da falta trifásica, isso caracteriza que o sistema se manteve estável no pós-falta. Levando em conta os resultados obtidos nos dois casos simulados, considerando as condições impostas nas duas análises, percebe-se que o sistema de duas áreas de Kundur não se mantém estável utilizando apenas o sistema de excitação nas máquinas síncronas, foi necessário implementar o controle por *FACTS*, através do SVC, para o sistema se manter estável.

Capítulo 6

Conclusões

Inicialmente, foram realizados os estudos dos modelos dos sistemas, de estabilidade transitória e dos dispositivos *FACTS*, isso foi feito com objetivo de simular computacionalmente o comportamento de um sistema elétrico de potência sujeito a uma grande perturbação. As simulações foram realizadas através da elaboração de uma série de programas em *MatLab* e o *SimPowerSystem*. Esses programas foram feitos utilizando como base as equações diferenciais e algébricas estudadas no capítulo de modelagem. Com esses programas foram simulados dois tipos de sistemas de potência, o máquina *vs* barramento infinito e o preservando a estrutura da rede.

Dos resultados das simulações para um dado sistema sujeito a um curto-circuito, o fator que mais influência a sua estabilidade é o tempo de abertura dos disjuntores. Para evitar que o sistema se torne instável após a falta, a análise de estabilidade transitória tem o objetivo de determinar o maior tempo de abertura dos disjuntores possível, de maneira que o sistema ainda permaneça estável, esse é o denominado tempo de abertura crítico dos disjuntores t_{cr} .

O modelo do sistema máquina *vs* barramento infinito possui a estrutura mais simples, por ser composto apenas pelo barramento do gerador síncrono ligado ao barramento infinito, através de duas linhas de transmissão, sendo sua análise feita apenas no barramento do gerador. Por ser muito simples, a análise de estabilidade transitória desse sistema é feita com menos dificuldade. Devido a isso, para essa análise foram utilizados dois modelos de máquinas síncronas para resolução da estabilidade transitória do sistema: o modelo clássico, o modelo de dois eixos. Com isso, a simulação do sistema máquina *vs* barramento infinito é feita levando em conta o modelo da máquina síncrona e se o sistema possui ou não o controle por *FACTS*

Na análise de estabilidade do sistema máquina *vs* barramento infinito, o tempo de abertura crítico do modelo clássico sem *FACTS* foi $t_{cr} = 0.258$ s, enquanto a do modelo de dois eixos sem *FACTS* foi de $t_{cr} = 0.324$ s. Adicionando o dispositivo *FACTS*, do tipo *SVC*, no sistema, com uma constante de compensação $K_{SVC} = 0.15$, o tempo de abertura crítico do modelo clássico foi $t_{cr} = 0.644$ s, e o do modelo de dois eixos foi de $t_{cr} = 0.790$ s. Analisando esses resultados, percebe-se que o tempo de abertura crítico dos disjuntores mais que dobra quando é adicionado um dispositivo *FACTS* com $K_{SVC} = 0.15$ no sistema, tornando o sistema mais confiável.

A partir da análise da influência do *FACTS* na estabilidade do sistema, uma relação do tempo de abertura

crítico dos disjuntores (t_{cr}) com a constante de compensação K_{SVC} foi obtida. Essa relação é praticamente linear, indicando que quanto maior for K_{SVC} , maior será o tempo de abertura dos disjuntores. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura (5.36), que mostra as curvas do t_{cr} em relação ao K_{SVC} para os dois modelos de máquina síncrona. Os tempos de abertura críticos do modelo de dois eixos é sempre maior que do modelo clássico, sendo que o modelo de dois eixos é de uma ordem maior. Os resultados obtidos da análise do sistema máquina *vs* barramento infinito mostram que os dispositivos *FACTS* possuem uma grande influência na confiabilidade do sistema de potência.

O segundo tipo de sistema de potência simulação é o sistema preservando a estrutura da rede, onde a análise pode ser feita em qualquer barramento do sistema, não sendo limitadas apenas as barras dos geradores. Como essa análise enfoca diferentes barramentos do sistema, ela é mais adequada para redes com estruturas mais complexas. Com isso, o sistema de potência analisado nessa simulação é o sistema de duas áreas de Prabah Kundur, que é composto por quatro geradores síncronos, quatro transformadores, duas cargas, sendo utilizados onze barramentos e sete linhas de transmissão. A análise desse sistema é feita considerando o tempo de abertura dos disjuntores de 2.5 segundos e a presença de sistemas de excitação nos geradores síncronos, levando isso em conta, o sistema é simulado sem e com a presença do dispositivo *FACTS*, do tipo *SVC*, no meio da linha de transmissão 2.

Os resultados do primeiro caso de simulação, sistema sem *FACTS*, mostram que o sistema, nas condições indicadas, se torna instável após a falta trifásica, mesmo com a presença do sistema de excitação nas máquinas síncronas. Enquanto, os resultados do segundo caso de simulação, sistema com *FACTS*, indicam que as variáveis do sistema ficam em pontos de operação mesmo após a falta trifásica, o que caracteriza que o sistema é estável nas condições impostas. Essa análise deixa clara como pode ser importante a presença de um controle por *FACTS* para a confiabilidade do sistema em diferentes tipos de condições.

As análises realizadas nas simulações desses dois sistemas mostram como um sistema elétrico de potência pode ser frágil para os variados tipos de condições adversas, se mostrando pouco confiáveis quando não são utilizadas estratégias de segurança, proteção e de controle. Os resultados obtidos mostraram que o controle por *FACTS* possui boas características como reduzir o tempo de assentamento das variáveis. Com isso, para determinados casos, dispositivos como o *SVC* acabam sendo uma excelente estratégia de controle que pode ser empregada nos sistemas de elétricos de potência.

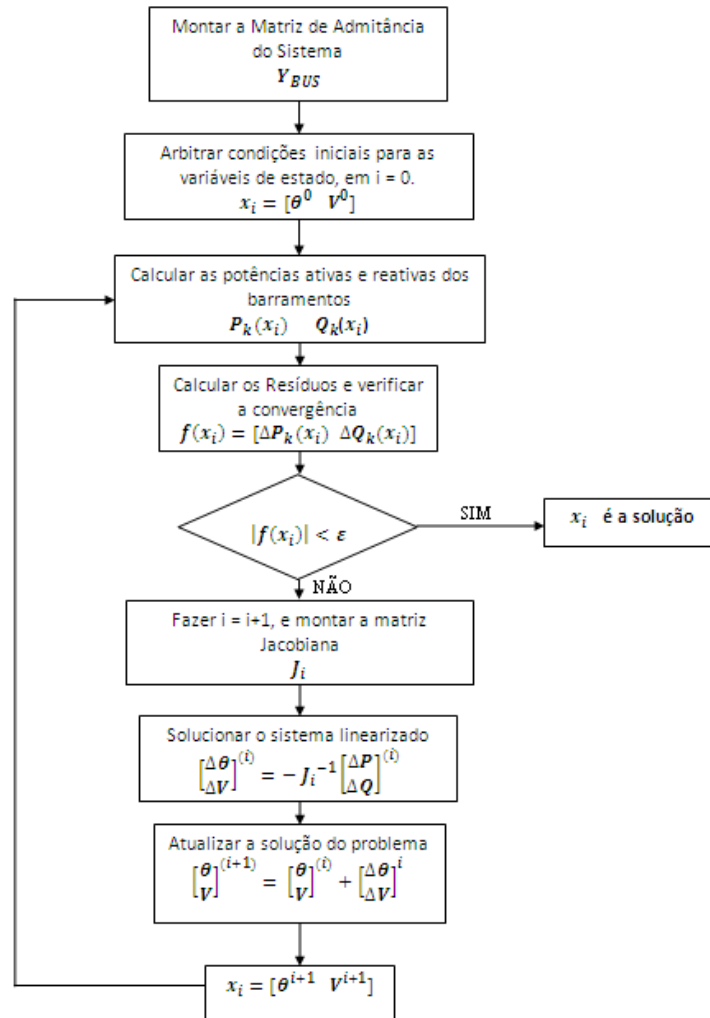
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIQUEIRA, D. S. *Controle não Linear Aplicado a Dispositivos FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. EESC - USP, 2012.
- [2] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: Mc-Graw Hill, 1993.
- [3] COSTA, A.; SILVA, A. *Controle de Estabilidade de Sistemas Elétricos*. EESC, 2000.
- [4] BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. *Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos*. [S.l.]: EESC USP, 2000.
- [5] WATANABE, E. et al. *Tecnologia FACTS - Tutorial*. COPPE and GSP and IME, 1998.
- [6] PADIYAR, K. *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. [S.l.]: New Gates International Publisher, 2007.
- [7] JÚNIOR, G. *Análise da Influência de um Compensador de Reativos na Operação de Sistemas Elétricos Industriais com Cogeração*. Universidade Federal do Maranhão, 2008.
- [8] MONTICELLI, A. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. [S.l.]: Edgar Blucher, 1983.
- [9] CHIANG, H. *Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2011.
- [10] MATHUR, R.; VARMA, R. *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2002.
- [11] P.MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY. *Power System Dynamics: Stability and Control*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2008.
- [12] PADIYAR, K. *Power System Dynamics: Stability and Control*. [S.l.]: BSP, 2008.
- [13] SILVA, F. H. et al. Função de Lyapunov estendida para análise de estabilidade de Ângulo e de tensão em sistemas de potência de cargas dependentes da tensão. *Congresso Brasileiro de Automática*, Gramado, Brasil, 2004.
- [14] GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Power System Analysis*. [S.l.]: Mc Graw-Hill, 1994.
- [15] GLANZMANN, G. *FACTS - Flexible Alternating Current Transmission Systems*. ETH Zurich, 2005.

- [16] GHANDARI, M. Application of control lyapunov functions to static var compsator. *Conference on Control Applications*, Glasgow, Scotland, U.K, 2002.
- [17] PERSSON, J. *Kundur's Two-area Systems*. STRI AB, 2004.

ANEXOS

I. ALGORITMO FLUXO DE POTÊNCIA - MÉTODO NEWTON-RAPHSON



I. DIAGRAMA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA ELABORADA NO *SIMPOWERSYSTEM*

